

Jussi Taneli Monni

SUPRAJOHTEEN JÄNNITE-VIRTAMITTAUKSEN ANALYSOINTI

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Diplomityö
Maaliskuu 2019

ABSTRACT

JUSSI TANELI MONNI: An analysis of the voltage-current measurement of a superconductor

Tampere University

Master of Science Thesis, 65 pages, 12 Appendix pages

March 2019

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Renewable Electrical Energy Technologies

Examiner: Risto Mikkonen and Antti Stenvall

Keywords: superconductivity, critical current measurement, SFS-EN 61788-1, n -value, NbTi, current variance

Superconductivity enables new scientific breakthroughs, such as the ITER and the Large Hadron Collider. It also improves and replaces conventional electrical engineering systems such as magnetic resonance imaging (MRI). These solutions include a large amount of superconducting wires, all of which need to have their voltage-current characteristics tested. The established procedure for evaluating the serviceability of a superconducting wire is to undergo a critical current measurement on a sample of every produced wire unit. The purpose of this thesis is to look into the critical current measurement, also referred to as the voltage-current measurement. Results of critical current measurements are analysed and additional data is generated in form of simulations. The two approaches are compared. This thesis comprises two parts: a theoretical part and an experimental part. The theoretical part looks into the background knowledge necessary for understanding the functionality of a commercial superconducting wire and reasoning behind its complicated internal structure. It reviews the current commercial superconductor materials and explains the merits of the ubiquitous NbTi based wires as the enabler of the current prevalence of MRI. The thesis also provides an historical review on the development of critical current measurement and its influence on introducing standards for critical current measurement of superconducting materials is discussed. The parts of aforementioned standards relevant to the scope of this thesis are presented. The experimental part analyses the impact of variances in current and voltage on the confidence intervals of the software tool V-I-analysointityökalu determined critical current and n -value. The importance of n -value is looked into both in the literature review part and with a calculation example of magnetic field decay of a superconductor magnet circuit. The effect of selecting and weighting critical current measurement data is further discussed. The recommended settings to use with the software tool are introduced and a comprehensive user guide is written to support efficient use of the tool.

TIIVISTELMÄ

JUSSI TANELI MONNI: Suprajohteen jännite-virtamittauksen analysointi

Tampereen yliopisto

Diplomityö, 65 sivua, 12 liitesivua

maaliskuu 2019

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tarkastajat: leht. Risto Mikkonen ja dos. Antti Stenvall

Avainsanat: suprajohtavuus, kriittisen virran mittaust, SFS-EN 61788-1, n -arvo, NbTi, virtavarianssi

Suprajohtavuus mahdollistaa uusia tieteellisiä läpimurtoja, kuten ITER:in ja Cernin LHC:n. Sen avulla korvataan konventionaalisia sähkötekniisiä järjestelmiä, kuten magneettikuvauslaitteita. Nämä teknologiat vaativat paljon suprajohtavaa johdinta, jonka jännite-virta-ominaiskäyrä täytyy selvittää. Kriittisen virran mittaus on tähän tarkoitukseen vakiintunut toimenpide, joka suoritetaan näyteosuudelle jokaisesta tuotetusta johdinyksiköstä. Tämän diplomityön tarkoitus on tarkastella kriittisen virran mittauksista, johon viitataan myös termillä $V(I)$ -mittaus. Todellisten johtimien kriittisen virran mittausdataa analysoidaan ja sitä verrataan työn osana tuotettuun simulaatiodataan. Tämä diplomityö koostuu kahdesta osasta: teoriasta ja koeosiosta. Teoriaosuus esittelee suprajohteen toiminnan ja monimutkaisen johdinrakenteen ymmärtämiselle välttämättömän taustatiedon. Se käy läpi tämänhetkiset kaupalliset suprajohtomateriaalit ja selittää ainutlaatuisten NbTi-pohjaisten johdinten menestyksen nykyaikaisissa magneettikuvauslaitteissa. Diplomityö luo lisäksi katsauksen suprajohteiden kriittisen virran mittauksen historiaan ja tekijöihin, jotka johtivat alan standardien kehittämiseen. Kriittisen virran mittauksen standardi NbTi-johtimille liittyy keskeisesti tähän diplomityöhön, joten sitä referoidaan työlle oleellisilta osin. Kokeellinen osio tutkii virran ja jännitteen varianssien vaikutusta V-I-analysointityökalu-tietokoneohjelman määrittämiin kriittisen virran ja n -arvon luottamusväleihin. n -arvon vaikutusta arvioidaan sekä kirjallisuuskatsauksessa että magneettisen vaimenemisen esimerkin kautta. Lisäksi mittausdatan painottamista kriittisen virran mittauksessa tarkastellaan. V-I-työkalun käyttämiseen suositellut asetukset esitellään ja kattava mittausmanuaali kirjoitetaan tukemaan työkalun tehokasta hyödyntämistä.

ALKUSANAT

Haluan kiittää ensiksi Risto Mikkosta diplomityön aiheesta, ohjaamisesta ja tarkastamisesta. Toiseksi kiitän Joonas Järvelää V-I-analysointityökalun luomisesta, neuvoista ja alustavasta Matlab-algoritmista, jolla tuotetaan simuloituja $V(I)$ -käyriä. Kolmanneksi kiitän Luvata OY:tä mittausdatasta. Lopuksi kiitän perhettäni tuesta ja tyttöystävääni, jota ilman tätä diplomityötä ei olisi aloitettukaan.

Tampere, 3.3.2019

SISÄLTÖ

1. Johdanto	1
2. Suprajohtavuus ilmiönä – transitio normaalitilaan	2
2.1 Suprajohtavuuden ominaispiirteet	2
2.1.1 Pinning	4
2.1.2 Vuon ryömintä	6
2.2 Kaupalliset suprajohteet	6
2.2.1 Nb ₃ Sn	7
2.2.2 NbTi	8
2.2.3 YBCO	11
2.2.4 BSCCO	12
2.2.5 MgB ₂	12
2.2.6 Yhteenveto kaupallisista suprajohteista	14
2.3 Transitio ja potenssilaki	15
2.3.1 Potenssilain kuvaus ja tulkinta	15
2.3.2 Transition vertailu eri suprajohdemateriaalien välillä	16
2.4 Transition kytkentä quench-analyysiin ja stabiilisuuteen, n -arvon merkitys	17
2.4.1 Quench	17
2.4.2 Vuonhyppy	18
2.4.3 Kryogeeninen stabiilisuus	19
2.4.4 Adiabaattinen stabiilisuus	20
2.4.5 Stabiilisuus ja HTS	21
2.4.6 n -arvo	22
2.5 Persistointi ja MRI-laitteet	22
2.5.1 Magneettinen vaimeneminen persistoidussa magneettipiirissä	23
2.5.2 Esimerkki persistoidusta magneettipiiristä	24
2.5.3 Suprajohteen resistiivisyys ja kriittinen virta, n -arvo	25
2.5.4 MRI-laitteet	26

3.	$V(I)$ -mittauksen kuvaus	28
3.1	$V(I)$ -mittauksen historia	28
3.1.1	Varhaiset mittaukset (1914–1940)	28
3.1.2	Materiaalien ja magneettien kehitys (1950–1970)	29
3.1.3	Standardien kehitys ja suprajohteiden kaupallistuminen (1970–1990)	30
3.2	Mittausjärjestelmän kuvaus	31
3.2.1	Mittalaitteisto	32
3.3	Mittauksen ongelmia ja ratkaisuita	33
3.4	Standardien tiivistetty referointi	35
3.4.1	Vaatimukset johtimelle	35
3.4.2	Vaatimukset mittausasetelmalle	35
3.4.3	Mittauksen läpivienti	36
3.4.4	n -arvon määrittäminen	37
3.5	Eri kriteerit ja niiden käyttö	37
3.5.1	Sähkökenttäkriteeri	37
3.5.2	Resistiivisyyskriteeri	38
3.5.3	Offset-kriteeri	38
3.6	Analysoinnin haasteet	39
4.	Tilastollinen analyysi	41
4.1	Varianssin määrittäminen	41
4.1.1	Jännitevarianssin määrittäminen	41
4.1.2	Virtavarianssin määrittäminen	42
4.2	Eri varianssien vaikutus potenssilakisovituksen virherajoihin	43
4.2.1	Kohina virrassa	43
4.2.2	Kohina jännitteessä	45
5.	Painotuksen vaikutus	47
5.1	Painotustavat	47
5.2	Painotusesimerkkejä	49
5.2.1	Todellisen mittausdatan esimerkkejä	49

5.2.2	Simulaatioesimerkkejä	51
5.3	Cutoff-suodatus	55
6.	Yhteenveto	56
	Lähteet	57
	LIITE A. MITTAUSMANUAALI	66
A.1	Mittaussarjan analysointi	66
A.1.1	Esikäsittely	67
A.1.2	Jatkokäsittely	68
A.1.3	Luottamusvälien määrittäminen	69
A.2	Analysoi yksittäinen mittaus	72
A.3	Yhdistä mittauksia yhteen tiedostoon	73
A.4	Virtalähteen kohinaprofilin määrittäminen	74
A.5	Tyypillisiä ongelmia ja bugeja	75

KUVAT

2.1 Shubnikov-tila.	3
2.2 Pinning-voima.	5
2.3 Nb ₃ Sn-monifilamenttijohtimen pronssitie-valmistusprosessi.	8
2.4 NbTi-monifilamenttijohtimen valmistusprosessi.	9
2.5 Monifilamenttijohtimen rakenne.	10
2.6 YBCO-johdinten rakenne.	11
2.7 MgB ₂ -monifilamenttijohtimen valmistusprosessi.	13
2.8 Potenssilain kuvaaja	15
2.9 LTS ja HTS, n -arvon vaikutus	16
2.10 Vuonhyppy	18
2.11 n -arvon määrittäminen.	22
2.12 Persistoidun magneetin piirikaavio.	23
2.13 n -arvon vaikutus virtaan persistoidussa tilassa.	26
3.1 $V(I)$ -käyrämuotoja.	34
3.2 Näytteenpidin.	35
3.3 Offset-kriteeri	39
4.1 Jännitevarianssin määrittäminen potenssilakikorjauksella.	42
4.2 Virtavarianssin määrittäminen mittauksesta.	43
4.3 Virtakohinan vaikutus kriittiseen virtaan	44
4.4 Virtakohinan vaikutus n -arvoon	45

4.5	Jännitekohinan vaikutus kriittisen virran arvoon.	45
4.6	Jännitekohinan vaikutus n -arvoon.	46
5.1	Painotusesimerkki, jonka painotusvälinä kaksi jännitekriteeriä.	48
5.2	Esimerkki painotusvälin valinnasta.	49
5.3	Esimerkki painotuksista ja virtakohinasta.	52
5.4	Esimerkki laatikkopainotuksesta ja noidanhattupainotuksesta.	52
A.1	Päävalikko.	66
A.2	$V(I)$ -mittauksen esikäsittelijä.	67
A.3	$V(I)$ -analysointityökalun näkymä.	68
A.4	Jännitevarianssin ja virtavarianssin määrittäminen.	70
A.5	Mittaussarjan analysoinnin yhteenveto.	71
A.6	Yksittäisen mittauksen analyysin yhteenveto.	73
A.7	Mittausten yhdistäminen samaan tiedostoon.	74
A.8	Virhe mittausdatassa esikäsittelijän.	75
A.9	Potenssilaki ei sovi oikein.	76
A.10	Painotusalue jatkuu liian ylös $V(I)$ -käyrällä.	77

TAULUKOT

2.1	Yhteenveto kaupallisista suprajohteista.	14
5.1	Yhteenveto $V(I)$ -mittauksista näytteelle 1 ja käyrän sovitukselta noidanhattupainotuksella.	50
5.2	Yhteenveto $V(I)$ -mittauksista näytteelle 1 ja käyrän sovitukselta laattikkopainotuksella.	50
5.3	Yhteenveto $V(I)$ -mittauksista näytteelle 2 ja käyräsovitteesta noidanhattupainotuksella.	51
5.4	Yhteenveto $V(I)$ -mittaussarjasta näytteelle 2 ja käyräsovitteesta laattikkopainotuksella.	51
5.5	Sovitekäyrien hyvydet.	54
5.6	Virtavarianssin vaikutus n -arvon virherajoihin.	54

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	vaihtovirta
BSCCO	Bi-Sr-Ca-Cu-pohjaiset suprajohdemateriaalit
DC	tasavirta
HTS	korkean lämpötilan suprajohde (<i>High Temperature Superconductor</i>)
IBAD	ionisuihkuavusteinen päällystäminen
LTS	matalan lämpötilan suprajohde (<i>Low Temperature Superconductor</i>)
MRI	magneettikuvaus
MSE	keskineliövirhe
PCS	persistointikytkin
SSE	virheneliösumma
SSR	neliösumma
SST	kokonaisneliösumma
VAMAS	Versailles Agreement on Advanced Materials and Standards
YBCO	Y-Ba-Cu-O-pohjainen suprajohdemateriaali

A	pinta-ala
a	halkaisija
α_{Stekly}	Steklyn parametri
\vec{B}	magneettivuon tiheys
B	magneettivuon tiheyden itseisarvo
B_c	kriittinen magneettivuon tiheys
B_{c2}	ylempi kriittinen magneettivuon tiheys
\vec{B}_{irr}	palautumattomuuskentän magneettivuon tiheys
β	adiabaattisen stabiilisuuden parametri
C	lämpökapasiteetti
e	elektronin varaus
\vec{F}	voima
\vec{F}_L	Lorenz-voima
\vec{H}	magneettikentän voimakkuus
H_{c1}	alempi kriittinen magneettikentän voimakkuus
H_{c2}	ylempi kriittinen magneettikentän voimakkuus
\vec{H}_{irr}	palautumattomuuskentän magneettikentän voimakkuus
h	lämmönsiirtokerroin
I	sähkövirta
I_c	kriittinen virta
\vec{J}	virrantiheys

J	virrantiheyden itseisarvo
J_c	kriittinen virrantiheys
K	regressiomallin muuttujien lukumäärä
k	lämmönjohtavuus
l	johtimen pituus
L	induktanssi
λ	Londonin tunkeutumisvyvyys
m_e	elektronin massa
μ	odotusarvo
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti
M	havaintojen lukumäärä
N	lukumäärä
N_k	käämin kierrosten lukumäärä
n	transition jyrkkyyttä kuvaava parametri
n_s	suprajohde-elektronien lukumäärä
Φ	magneettivuo
R^2	selitysastekerroin
R_{adj}^2	muunnettu selitysaste
ρ	resistiivisyys
Q	lämpöenergia
σ	keskihajonta
σ^2	varianssi
T	lämpötila
t	aika
τ	vaimenemisen aikavakio
T_c	kriittinen lämpötila
V	jännite

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö tarkastelee niobititaani-suprajohteen jännite-virtakäyrän analysointia uuden ohjelmatyökalun avulla. Jännite-virtamittauksella selvitetään suprajohteen kriittisen virran arvo ja n -arvo, jotka ovat tärkeitä johtimen suorituskykyä kuvaavia parametrejä.

Työn tavoitteina on luoda kirjallisuuskatsaus suprajohtavuuteen ilmiönä, kuvata jännite-virtamittauksia, tarkastella varianssien vaikutusta mittauksien tuloksiin sekä tuottaa käyttöohje V-I-analysointityökalulle, jonka on tarkoitus päätyä Luvata OY:n käyttöön.

$V(I)$ -analyysi on tehtävä näytteille kaikista käyttöön päätyvistä suprajohtekomposiittijohtimista. Tämä johtuu siitä, että jokainen valmistettu johdin on yksilö. Johtimen ominaisuuksia mitattaessa on paljon tekijöitä, jotka täytyy määrittää tai vakioida, jotta riippumattomat testit päätyvät samaan tulokseen johtimen suorituskyvystä. On tärkeää, että johtimen hyödyntämisestä kiinnostuneet voivat vertailla tuotteita luotettavasti ja tehokkaasti.

On tavallisesti valmistajan tehtävänä suorittaa tarvittavat $V(I)$ -mittaukset johtimilleen. Näitä mittauksia säätelevät standardit. Huomionarvoista tässä diplomityössä käytetyssä analysointityökalussa on sen tapa käsitellä variansseja.

Yhteenvedossa on tarkoitus kertoa, kuinka V-I-analysointityökalu vastasi sille asetettuihin tavoitteisiin ja päätykö se lopulta teollisuuskäyttöön.

2. SUPRAJOHTAVUUS ILMIÖNÄ – TRANSITIO NORMAALITILAAN

Tämä luku käsittelee suprajohtavuutta ilmiönä ja kuvaa suprajohtavuuden ominaispiirteitä. Lisäksi luodaan katsaus kaupallisiin suprajohtomateriaaleihin ja kuvataan transitiota suprajohtavasta tilasta normaalitilaan.

2.1 Suprajohtavuuden ominaispiirteet

Suprajohtavuudella on kaksi ainutlaatuista ominaispiirrettä: resistiivisyyden puuttuminen ja Meissner-ilmiö. Meissner-ilmiö tarkoittaa, että magneettikenttä poistuu suprajohtavasta materiaalista. Se on täydellinen diamagneetti. Jos ulkoisessa magneettikentässä oleva suprajohtava kappale jäähdytetään kriittisen lämpötilan alapuolelle, niin magneettikenttä poistuu materiaalista. Tämän ilmiön havaitsivat ensimmäisinä Walther Meissner ja Robert Ochsenfeld vuonna 1933. [68]

Suprajohtavalla tilalla on kolme kriittistä parametriä, lämpötila (T_c), magneettivuon tiheys (B_c) ja virrantiheys (J_c). Kukin parametri on riippuvainen kahdesta muusta, niin että omille akseleilleen asetettuna nämä parametrit virittävät kriittisen pinnan, jonka sisällä suprajohtava tila voi esiintyä. Pinnan yläpuolella suprajohtava tila menetetään ja materiaali palautuu resistiiviseksi. [22]

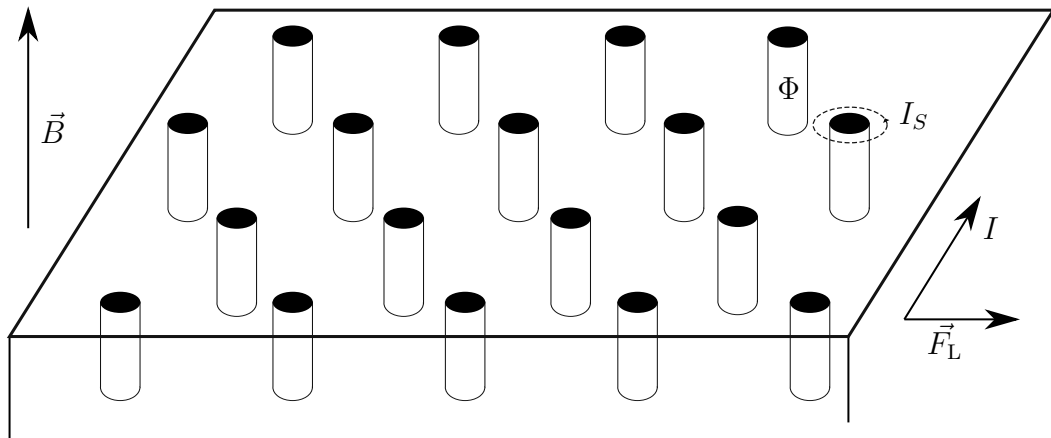
Suprajohteet voidaan jakaa lajeihin I ja II sen mukaan, onko Meissner-ilmiö, eli magneettikentän häviäminen niissä täydellinen. Lajin I suprajohteilla Meissner-ilmiö esiintyy aina täydellisenä. Ulkoiselle magneettikentälle altistettuna suprajohteessa generoituu suojavirtoja Londonin tunkeutumissyvyyden pituiselle matkalle kappaleen pintaan. Yli H_c :n suuruinen magneettikentän voimakkuus johtaa suprajohtavan tilan menettämiseen. [51, s. 355–361]

Londonin tunkeutumissyvyyden määrittelee yhtälö [83, s. 112]

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m_e}{\mu_0 n_s e^2}}, \quad (2.1)$$

joka kuvantaa magneettikentän tunkeutumista suprajohtavaan materiaaliin. Yhtälössä m_e on elektronin massa, n_s suprajohtavuuselektronien lukumäärä tilavuusyksikköä kohti ja e on alkeisvaraus. Suojavirta on suurimmillaan kappaleen pinnassa ja vaimenee eksponentiaalisesti kappaleen sisällä. Kun lämpötila nousee, suprajohtavuuselektronien lukumäärä vähenee ja tunkeutumisvyvyys kasvaa.

Lajin II suprajohteilla on kaksi kriittistä magneettikentän voimakkuutta, H_{c1} ja H_{c2} . Alempaan kriittiseen magneettikentän voimakkuuteen H_{c1} asti Meissner-ilmiö on täydellinen. Kun magneettikentän voimakkuus on H_{c1} :n ja H_{c2} :n välissä, magneettivuo pääsee tunkeutumaan suprajohtebulkkiin normaaliyohteisina vuoputkina muun osan materiaalista säilyttäessä suprajohtavan tilan. Tätä ilmiötä havainnollistaa kuva 2.1. Tätä sekatilaa kutsutaan Shubnikov-tilaksi neuvostoliittolaisen fyysikon Lev Shubnikovin mukaan. Ulkoisen magneettikentän kasvaessa vuoputket pakkautuvat tiheämmin ja pienemmälle etäisyydelle toisistaan. [19, 51, 84]



Kuva 2.1 Lajin II suprajohte ulkoisessa magneettikentässä, jonka voimakkuudelle pätee $H_{c1} < H < H_{c2}$. Magneettivuo Φ tunkeutuu kappaleeseen kvantittuneiden vuoputkien muodossa. Kuvan \vec{B} on magneettivuon tiheys, I_s on suojavirta, I on kappaleen kautta kulkeva virta, \vec{F}_L on vuoputkiin vaikuttava Lorentz-voima. Mukautettu lähteistä [51, 19, s. 410, s. 56].

Lajin II suprajohteiden ylempi kriittinen magneettikentän voimakkuus on jopa useita kertaluokkia suurempi kuin alempi kriittinen magneettikentän voimakkuus. Kaikki käytännön sovellutukset perustuvatkin lajin II suprajohtemateriaaleihin ja niiden ominaisuuksiin Shubnikov-tilassa. Normaaliyohteisten vuoputkien olemassaolo ei itsessään aiheuta häviöitä tai resistanssia materiaaliin, vuoputkien liike sen sijaan aiheuttaa. Vuoputkien liikettä pyritäänkin estämään ja rajoittamaan esimerkiksi luomalla materiaaliin pinning-keskuksia, sekä riittävin virta-, magneettikenttä- ja lämpötilamarginaalein. [48] [19, s. 410–411]

2.1.1 Pinning

Vuoputket ovat kuvan 2.1 mukaisesti kappaleeseen syötettyyn virtaan I nähden kohtisuorassa. Niihin kohdistuu Lorentz-voima, jonka määrittelee yhtälö

$$\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2.2)$$

Lorentz-voima pyrkii liikuttamaan vuoputkia. Puhtailla lajin II suprajohteilla pienikin Lorentz-voima riittää aiheuttamaan liikettä. Vuoputket pystyvät kulkemaan vapaasti sisään ja ulos materiaalista, sekä liikkumaan siinä. Liikkeestä indusoituu jännite virrallisen materiaalin yli, mikä tarkoittaa resistanssin ja resistiivisten häviöiden syntymistä. Vuoputket täytyy kiinnittää paikalleen pinning-keskuksiin, joita luodaan lisäämällä epäpuhtauksia suprajohdemateriaaliin [83, s. 54]. Pinning-keskukseen syntyy potentiaali-kaivo. Lorentz-voiman vaikutuksesta vuoputken vapaa energia kasvaa ja se voi irroittautua paikaltaan. Jos vuoputket irtoavat pinning-keskuksista, ne liikkuvat Lorentz-voiman ja pinning-voiman erotuksen suuruisen voiman vaikutuksesta. Liike on dissipatiivista ja sitä kutsutaan vuovirraksi (*flux flow*) [51, s. 385]. Yksittäisten vuoputkien lisäksi Lorenz-voima vaikuttaa koko suprajohtavaan kappaleeseen. Esimerkiksi suprajohdemagneetit täytyy tukea mekaanisesti, jottei johdin pääse liikkumaan ja siten generoimaan lämpöä. Lorenz-voima riippuu yhtälön 2.2 mukaisesti virrantiheydestä ja magneettivuon tiheydestä. Sen sijaan toimintalämpötila ei suoraan vaikuta tuen tarpeeseen [44, s. 72]. [51, 83, ss. 361–366, ss. 54–55]

Matalan lämpötilan suprajohteille eli LTS:lle (*Low Temperature Superconductor*) kriittisen virran ja magneettivuontiheyden välisen suhteen määrittelee pinning-funktio, jolle on olemassa empiirinen kaava. Kriittinen Lorentz-voima on yleisessä muodossaan [19, s. 412]

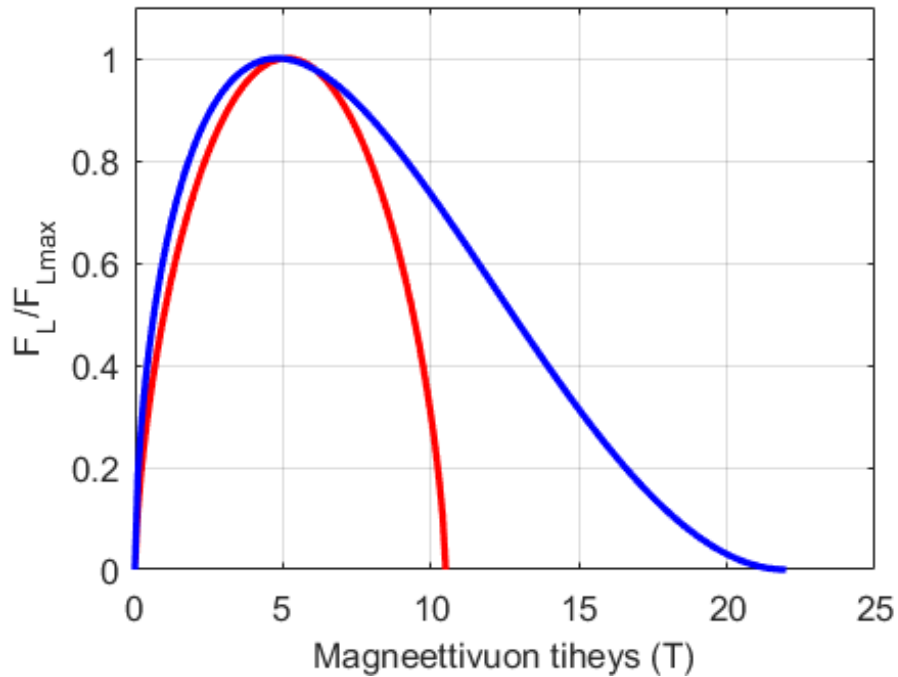
$$F_L \equiv I_c B = k f(b), \quad (2.3)$$

jossa k on vakio- μ_0 suhdeluku ja $f(b)$ on pinning-funktio. Pinning-funktion yleinen muoto on

$$f(b) = b^p (1 - b)^q, \quad (2.4)$$

jossa p ja q ovat suprajohdemateriaalista riippuvia vakioita, b on redusoitu magneettikenttä B/B_{c2}^* ja B_{c2}^* on tehollinen ylempi kriittinen magneettivuon tiheys. Tässä kentässä materiaalin kriittinen virta häviää, koska vuoputkia paikallaan pitävä pinning-voima laskee nolnaan [19, s. 411]. B_{c2}^* on alhaisempi kuin B_{c2} , koska se ottaa huomioon käytännön johtimissa esiintyvät epähomogeenisuudet, jotka vähentävät pinning-voimaa. Kuvassa 2.2 on esitetty pinning-funktion mukaan piirretyt käyrät $B-F_L/F_{Lmax}$ -tasossa. NbTi-suprajohteella suurin Lorenz-voima esiintyy noin

5,1 T:n vuontiheydellä, kun taas Nb₃Sn:lla noin 4,8 T:n vuontiheydellä. Suurin mahdollinen Lorentz-voima täytyy ottaa huomioon sekä short-sample-mittauksessa, jossa näytejohtimen pituus on muutamasta senttimetristä kymmeniin senttimetreihin, että valmiin sovellutuksen kuten magneetin suunnittelussa. Tämän vuoksi johtimeen vaikuttavan Lorentz-voiman määrittäminen kuuluu myös V-I-analysointityökalun ominaisuuksiin.



Kuva 2.2 Magneettivuon tiheys normalisoidun pinning-voiman funktiona NbTi- ja Nb₃Sn-suprajohtamateriaaleille. Punainen käyrä kuvaa NbTi- ja sininen käyrä Nb₃Sn-suprajohtetta. B_{c2}^* NbTi:lle 10,5 T ja Nb₃Sn:lle 22,0 T. Yhtälön 2.4 mukaiset eksponentit p ja q ovat NbTi-suprajohteelle 0,66 ja 0,69 ja Nb₃Sn:lle 0,56 ja 2,0. Mukautettu lähteestä [19, s. 413].

MgB₂-näytteille on useissa tutkimusjulkaisuissa määritetty yhtälön 2.4 mukaisia p - ja q -kertoimia, mutta nämä vaihtelevat merkittävästi näytteiden välillä, joten yksinkertaista kaikkiiin MgB₂-suprajohteisiin pätevää pinning-yhtälöä ei voida määrittää samoin kuin matalan lämpötilan suprajohteilla. Johtimen muoto, lämpökäsittely, suprajohtavan faasin kiderakenne sekä douppaus muuttavat oleellisesti pinning-ominaisuuksia [11, 28, 63, 66]. Korkean lämpötilan suprajohteilla eli HTS:llä (*High Temperature Superconductor*) yllä esitetty pinning-malli ei myöskään päde, vaan tarvitaan malli, joka huomioi anisotrooppisuuden, vuon ryöminnän ja epähomogeenisemmän rakenteen. Yksinkertaista ja nämä tekijät huomioon ottavaa mallia ei ole vielä kehitetty. [81]

2.1.2 Vuon ryömintä

Kun lajin II suprajohteeseen johdetaan virtaa, normaalijohteisiin vuoputkiin kohdistuu kaksi voimaa. Yhtälön 2.2 mukainen Lorentz-voima pyrkii liikuttamaan vuoputkia ja pinning-voima pitää vuoputkia kiinni pinning-keskuksissa. Matalan lämpötilan suprajohteilla pinning-energiat ovat korkeita, joten vuoputket saadaan tehokkaasti kiinnitettyä pinning-keskuksiin. Vuoputkien liike pinning-keskuksien välillä eli vuon ryömintä on sen sijaan ongelmallista HTS-materiaaleilla, koska niiden pinning-potentiaali on pieni. [51, 83, ss. 361–366, ss. 54–55] Niillä vuoputket saattavat lähteä liikkumaan pinning-keskuksesta toiseen ja dissipoidaan näin lämpöä. Vuon ryömintä aiheuttaa jännitettä suprajohteen yli. Tätä vuoputkien liikettä pinning-keskuksesta toiseen kutsutaan vuon ryöminnäksi. [83, s. 64–65]

2.2 Kaupalliset suprajohteet

Suprajohtavia materiaaleja on tähän mennessä löydetty tuhansia, mutta vain muutama näistä on päätynyt kaupallisiin sovellutuksiin. Kaupallisesti tärkein suprajohtemateriaali on NbTi. Muita kaupallisia suprajohtemateriaaleja ovat Nb₃Sn, MgB₂, YBCO, Bi-2212 ja Bi-2223. Näistä kahta viimeistä vismuttipohjaista materiaalia kutsutaan myös yhteisnimellä BSCCO. NbTi ja Nb₃Sn ovat niin kutsuttuja matalan lämpötilan suprajohteita, kun taas YBCO ja BSCCO ovat korkean lämpötilan suprajohteita. MgB₂ asettuu ominaisuuksiensa puolesta näiden kategorioiden väliin. Kaupallisille suprajohtimille asetettuja vaatimuksia ovat muun muassa [53]:

- Korkea kriittinen lämpötila
- Korkea ylempi kriittinen magneettikentän voimakkuus
- Korkea virrantiheys
- Riittävä terminen ja sähkömagneettinen stabiilisuus
- Mekaaninen stabiilisuus, rasituksen- ja taivutuksenkesto
- Alhaiset AC-häviöt (AC-sovellutuksille)
- Kohtuulliset valmistuskustannukset

Uusia suprajohtavia materiaaleja löydetään edelleen [40] ja tuorein kaupallisesti menestynyt materiaali on vuonna 2001 löydetty MgB₂. Seuraavat kappaleet esittelevät kaupallisten suprajohteiden historiaa, ominaisuuksia ja valmistusprosessia.

2.2.1 Nb₃Sn

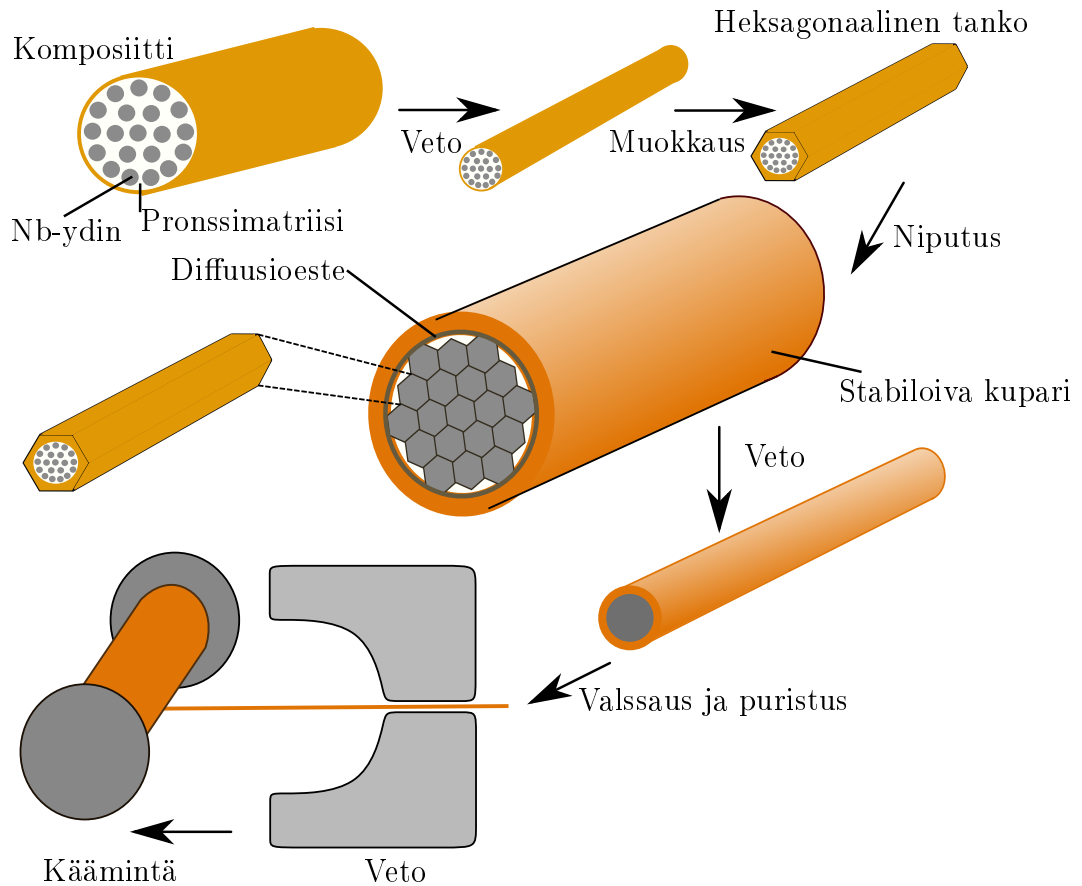
Niobitina on varhaisin edelleen tärkeistä kaupallisista suprajohteista. Suprajohtavuuden Nb₃Sn:ssa havaitsi ensimmäisenä yhdysvaltalainen tutkijaryhmä vuonna 1954 [67]. Korkean virran ja magneettikentän ominaisuudet raportoi ensimmäisenä J. E. Kunzler vuonna 1961 [54]. Vaikka alkuaineet niobium ja tina ovatkin taipuisia ja helposti muokattavia metalleja, on suprajohtava Nb₃Sn-faasi hauras. Johtimen vähäininkin taivuttaminen laskee merkittävästi kriittistä virtaa. Tästä syystä Nb₃Sn-johtimet täytyykin useimmiten käämiä lopulliseen muotoon ennen viimeistä lämpökäsittelyä [34]. Tätä menetelmää kutsutaan nimellä *Wind-and-React*. Jos reaktio tapahtuu ennen käämimistä, on kyseessä *React-and-Wind*. [83, ss. 162–163]

Nb₃Sn:n kriittinen lämpötila on 18 K, joka on matalan lämpötilan suprajohteiden joukossa korkea. Nb₃Sn-johdin pystyy kuljettamaan huomattavasti suurempia virrantiheyksiä kuin NbTi. Kun NbTi:n sähkömagneettiset ominaisuudet ovat sovelluksen kannalta riittämättömät, käytetään Nb₃Sn:a [97], jolla magneettivuontiheyden yläraja käytännön sovellutuksissa on 15–16 T [83]. Nb₃Sn:n kriittinen magneettivuon tiheys on noin 30 T.

Nb₃Sn-johtimiin kohdistuu edelleen tutkimus- ja kehitystyötä ja sen ominaisuuksia on saatu parannettua viimeisen 15 vuoden aikana [46]. Valmistusprosesseja on olemassa useita. Näistä tavallisimmat ovat jelly roll -menetelmä, pronssitiemenetelmä ja sisäisen tinan menetelmä. Jelly roll -menetelmässä Nb-, Sn-Ta- ja Nb-Ta-matot pinotaan päällekkäin ja rullataan Nb-Ta-keskuspuikon ympärille. Rulla päällystetään diffuusioesteellä ja vedetään johtimeksi. [83, s. 172]

Pronssitiemenetelmä on esitetty kuvassa 2.3. Aluksi niobi-tallium-sauvoja upotetaan pronssimatriisiin. Tallium toimii diffuusiokerroksena, joka estää kuparia reagoimasta tinan kanssa. Tämä billetti pursotetaan ja muokataan kuusikulmaiseksi. Näitä puikkoja pinotaan stabiloivaan kuparimatriisiin, pursotetaan uudestaan ja vedetään. Pinoamis-pursotusvaiheita toistetaan, kunnes ollaan saavutettu haluttu määrä filamentteja, yleensä muutamasta tuhannesta pariin kymmeneen tuhanteen. Tämä johdin kierretään valmiiksi käämiksi, joka monivaiheisessa lämpökäsittelyssä saa suprajohtavat ominaisuutensa, kun pronssimatriisin tina reagoi niobiumin kanssa. Vaikka lähtöaineet ovatkin taipuisia metalleja, on suprajohtava faasi hyvin hauras, eikä kestä taivuttelua. [83, 99]

Sisäisen tinan menetelmässä lähtötilanteessa kuparimatriisiin on upotettu niobium-filamentteja ja keskelle upotetaan tinasta valmistettu sauva. Tämä billetti vedetään ja muokataan kuusikulmaiseksi sauvaksi, joita pinotaan stabiloivan kuparin sisään. Kuparin ja niobitinasauvojen väliin tarvitaan diffuusioeste, joka estää tinan dif-



Kuva 2.3 Nb₃Sn-monifilamenttijohtimen pronssitie-valmistusprosessi. Mukautettu lähteestä [83, s. 164].

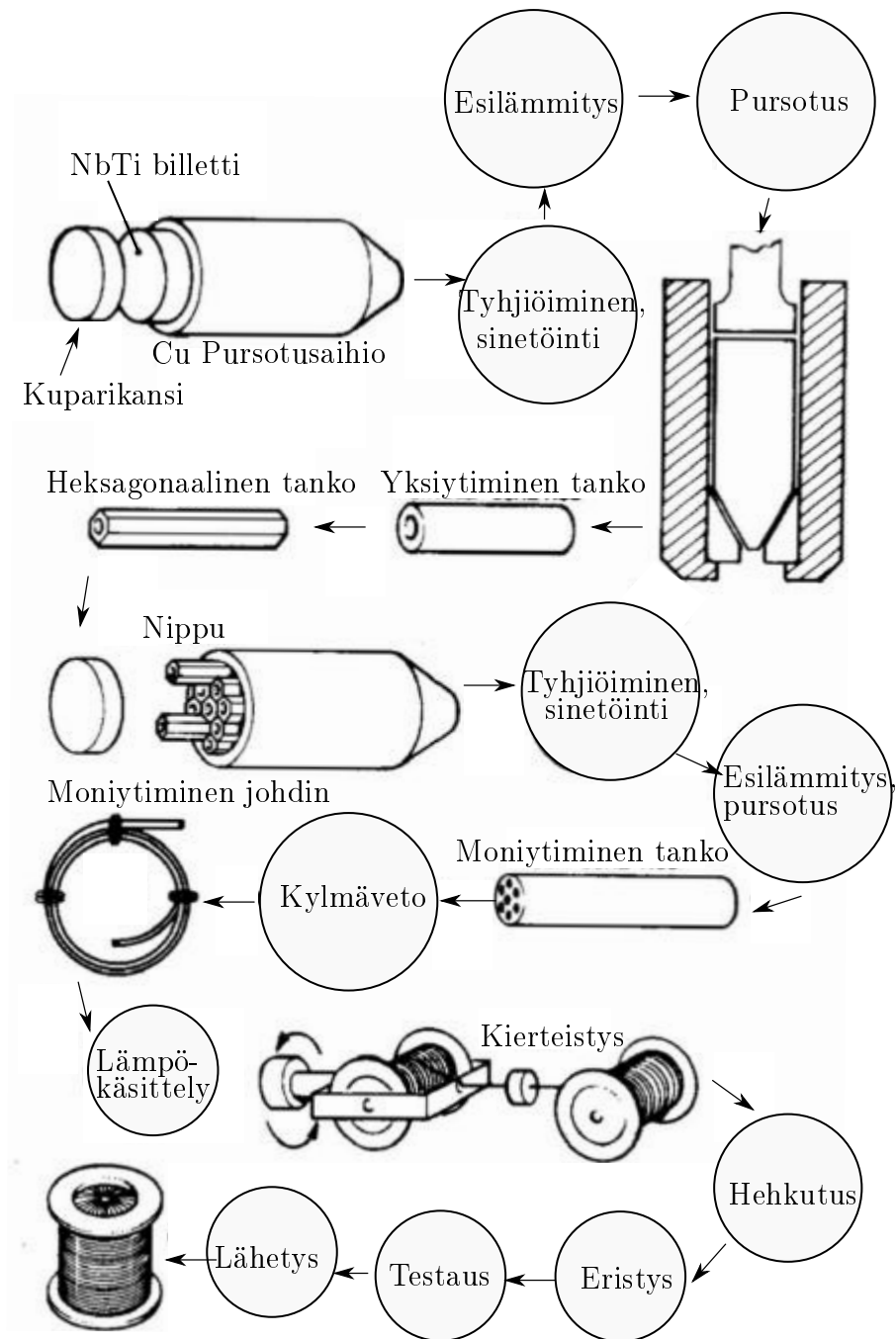
funtoitumisen kupariin lämpökäsittelyn aikana. Tähän tarkoitukseen käytetään esimerkiksi talliumia. Kupari-niobititaanibilletti puristetaan ohueksi tangoksi ja vedetään kylmänä lopulliseen pituuteensa. Johdin kierretään kelaksi ja lämpökäsitellään useiden päivien ajan, jolloin tina diffuntoituu niobium-filamenttien ympärille. [83, ss. 168–169]

2.2.2 NbTi

Niobititaani on kaupallisesti tärkein suprajohde. Sen suprajohtavat ominaisuudet havaitsi ensimmäisenä Atomics Internationalin tutkijaryhmä vuonna 1961 [5]. Ryhmä julkaisi ensin tuloksensa kokeistaan NbZr-yhdisteellä ja tämän artikkelin lopussa samalla mainitsivat saaneensa hyviä tuloksia NbTi-yhdisteellä. Vuonna 1964 valmistui ensimmäinen 10 teslan magneetti ja vuoteen 1967 mennessä NbTi:n korkeampi kriittinen kentänvoimakkuus H_{c2} johti NbZr-suprajohteiden syrjäyttämiseen. [6]

NbTi:n kriittinen lämpötila on noin 9 K. Sen etuna ovat suprajohtavan faasin mekaaniset ominaisuudet, eli sen taipuisuus ja muokattavuus. Siitä voidaan valmistaa

satojen kilometrien pituisia, monifilamenttirakenteisia johtimia. Suprajohtavan magneetin valmistaminen on vaivattomampaa NbTi:sta kuin Nb₃Sn:sta. NbTi-monifilamenttijohtimen monivaiheinen valmistusprosessi on esitetty kuvassa 2.4. [19, s. 434]

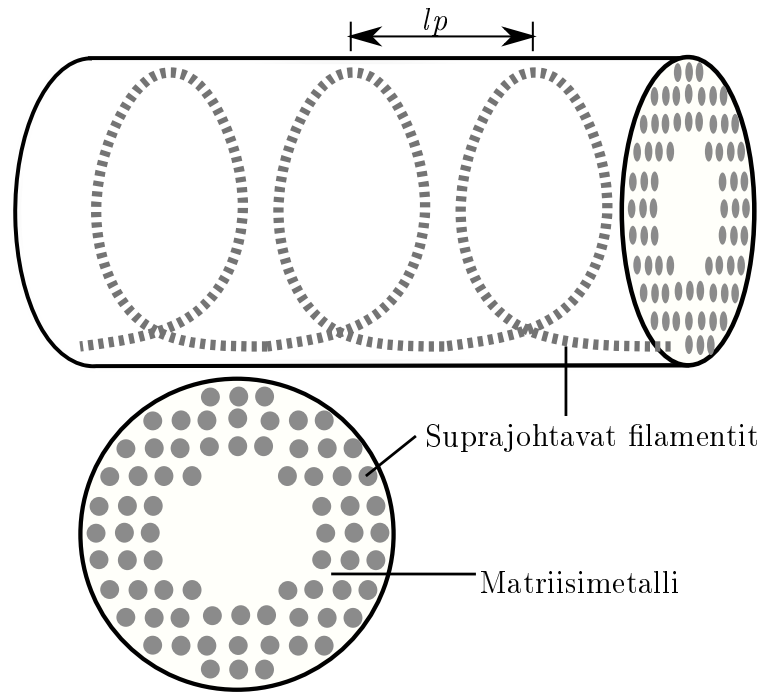


Kuva 2.4 Niobititaanijohtimen valmistusprosessi. Mukautettu lähteestä [95].

Ensin niobititaanista valmistettuja sauvoja upotetaan kuparibillettiin, johon on porattu reikiä näitä sauvoja varten. Kupari-niobititaaniputki suljetaan suurempaan kupariputkeen. Saatu billetti vedetään ja muokataan pohjaltaan kuusikulmaiseksi lieriöksi. Tämä paloitellaan ja saadut kuusikulmaset sauvat asetellaan uudestaan

nipuksi stabiloivan kuparin sisään ja vedetään kasattu billetti kylmänä usean kilometrin mittaan. [95]

Seuraavaksi johdin lämpökäsitellään, jolloin suprajohtava faasi muodostuu. Monifilamenttisilla johtimilla voi esiintyä kytkentäilmiö, jossa viereiset filamentit kytkeytyvät matriisimetallin kautta sähköisesti toisiinsa. Tällöin johdin käyttäytyy samoin kuin yksifilamenttinen johdin, jolloin stabiilisuus on huono. Lämpökäsitelty johdin kierretään pituusakselinsa ympäri eli *twistataan*, jotta vältetään filamenttien kytkeytyminen. Tuloksena on kuvan 2.5 mukainen johdinrakenne. Lopuksi johdin eristetään ja käämitään kelalle [95]. Valmis johdin muistuttaa ulkoisesti siis tavallista, halkaisijaltaan 0,1–1 mm:n kuparijohdinta. NbTi-filamenttien paksuus on sovelluskohteesta riippuen mikrometrin luokkaa. [83, ss. 145–146]



Kuva 2.5 Monifilamenttisen niobititaani-komposiittijohtimen poikkileikkaus. Kuvan esimerkkijohtimessa filamenttien lukumäärä on 66. Ylempi kuva havainnollistaa filamenttien kierteisyyttä. Nk. kierteistyspituus on l_p . Mukautettu lähteestä [19, s. 313].

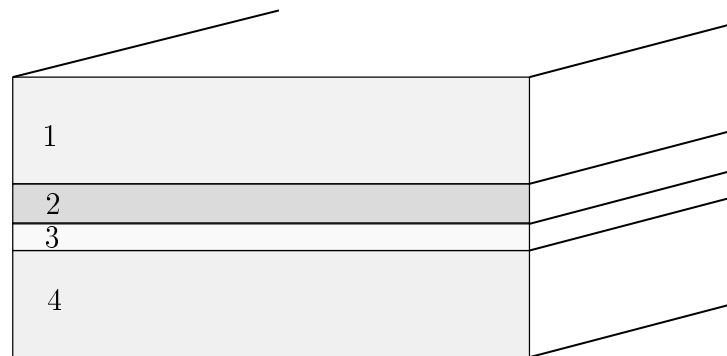
NbTi:lle ei ole vahvaa haastajaa alle 10 T sovellusalueella 4,2 K:n toimintalämpötilassa, sillä sen taivutettavuus ja valmistettavuus yhdistettynä korkean virrantiheyden ja magneettivuon tiheyden ominaisuuksiin on ylivoimainen [83, s. 153]. Korvaavan materiaalin tulisi saavuttaa parempi sähkömagneettinen suorituskyky ja samankaltaiset mekaaniset ominaisuudet pärjätäkseen kilpailussa NbTi:lle. [5, 6]

2.2.3 YBCO

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - suprajohtemateriaali on eräs vuonna 1986 löydettyistä korkean lämpötilan suprajohteista. Se oli ensimmäinen, jonka kriittinen lämpötila 90 K ylitti tyypin kiehumispisteen eli 77 K.

YBCO-materiaalia käytetään toisen sukupolven ohutkalvovirtajohtimiin. YBCO:lla on korkea kriittinen virrantiheys ja magneettivuontiheys. Ongelmana on ollut työläs valmistusprosessi ja vaikeudet valmistaa pitkiä yhtenäisiä johtimia. YBCO-rakeet eivät helposti kytkeydy toisiinsa, joten virta voi jäädä kiertämään niiden sisälle, eikä rakeen kautta seuraavaan. Kun näin käy, virran kulku bulkissa estyy herkästi. Niinpä monikiteisestä YBCO-bulkista ei voida valmistaa korkean virrantiheyden ja magneettikentän kestäviä johtimia. [17]

YBCO:sta valmistetaan sen sijaan kuvan 2.6 mukaisia ohutkalvojohtimia, joissa kiderakenne saadaan säännölliseksi. Yhden suprajohdekerroksen paksuus on silloin mikrometrin luokkaa [19, s. 315]. Kun kiteet saadaan aseteltua niin, etteivät niiden reunat muodosta estettä virran kululle, johtimen kriittinen virta lähestyy yksittäisen kiteen kriittistä virtaa. Käytettyjä tekniikoita ovat esimerkiksi IBAD (Ion beam-assisted deposition) ja YBCO-kiteiden epitaksinen kasvatus RABiTS-rakenteeksi (rolling-assisted, biaxially textured substrate). [77]



Kuva 2.6 YBCO-kalvojohtimen rakenne. Kerros (1) on jalometallikerros, (2) on suprajohdekerros, (3) on puskurikerros ja (4) metallisubstraattikerros. Puskurikerros voi sisältää monta ohutta kerrosta eri materiaaleista. Mukautettu lähteistä [19, 83, s. 314, 192].

Tämäntyyppisten ohutkalvojohtimien suprajohdeosassa virrantiheydet saavuttavat 77 K:n lämpötilassa jopa $1 \times 10^6 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$ [61]. Sen sijaan koko johtimen virrantiheys jää alhaisemmaksi, kun otetaan huomioon substraatin, välikerroksen ja stabilisoivan materiaalin osuudet. YBCO on lisäksi anisotrooppinen materiaali, eli kriittinen virrantiheys on alhaisempi, kun magneettikenttä on kohtisuoraan johdinta vasten. [55]

Nykyään YBCO:sta saadaan valmistettua noin 1 km:n pituisia johtimia, mikä on

aivan liian vähän magneettisovelluksia varten [78]. Valmistusprosessi on lisäksi kallis ja monimutkainen [23]. Virtajohtimisovelluksista YBCO-kaapeleilla on saatu lupaavia tuloksia. Ylivertaisen korkeiden magneettikenttien suorituskykynsä vuoksi YBCO on lupaava materiaali jatkokehitykselle ja siihen kohdistuukin paljon tutkimus- ja kehitystyötä. [96, 65]

2.2.4 BSCCO

Vismutti-strontium-kupari-kalsium-oksidiin korkean lämpötilan suprajohtavuuden havaitsi ensimmäisenä japanilainen tutkimusryhmä vuonna 1988. Löydön myötä suprajohteiden kriittinen lämpötila ylitti 100 K. Ryhmän kaupallisesti tärkeimmät yhdisteet ovat $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{O}_{8+x}$ eli Bi-2212 ja $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+x}$ eli Bi-2223. Näistä Bi-2212:n kriittinen lämpötila on noin 85 K ja Bi-2223:n noin 110 K [12, 13].

Käytännön sovelluksia ajatellen BSCCO-yhdisteiden ongelmana on anisotrooppinen käyttäytyminen ulkoisessa magneettikentässä. Magneettikentän suunta vaikuttaa merkittävästi suprajohtomateriaalin kriittiseen virrantiheyteen. Eroa virrantiheydessä johtimen suuntaisen ja johdinta kohtisuoran suuntaisen magneettikentän välillä voi olla kertaluokan tai jopa kahden verran [55]. Käytännön sovellutuksiin kuuluvat niin kutsutut ensimmäisen sukupolven HTS-virtajohtimet, joita käytetään pääosin ilman ulkoista magneettikenttää [82]. [52]

Valmistusprosessissa suprajohteyhdiste jauhetaan ensin hienojakoiseksi jauheeksi jolla täytetään matriisimetalli-hopeabilletti. Tämä billetti vedetään ja valssataan pitkäksi teipiksi. Suprajohtava faasi muodostuu toistuvien lämpökäsittely- ja puristusvaiheiden ansiosta. Keraamiset korkean lämpötilan suprajohteet ovat hauraita ja murtuvat helposti taivutettaessa. Siksi lämpökäsittelytöntä johdinta ei voida taivuttaa lopulliseen muotoonsa (esim. kela), vaan johdin toimitetaan käsiteltynä. [19, s. 314]

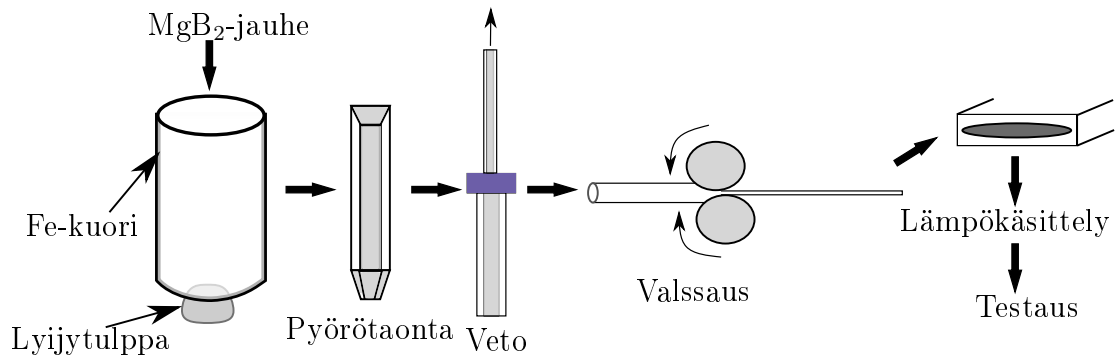
Viimeisen 15 vuoden aikana on saavutettu merkittävää edistystä Bi-2212-materiaalilla poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisilla monifilamenttijohtimilla. Ne ovat osoittautuneet teippimuotoisia johtimia vastustuskykyisemmiksi hajakenttiä kohtaan, eli ovat käytännössä isotrooppisia [45, 71, 56].

2.2.5 MgB_2

Magnesiumdiboridi on tässä osiossa esiteltävistä suprajohtomateriaaleista viimeisin. Sen suprajohtavat ominaisuudet havaitsi japanilainen tutkijaryhmä vuonna 2001 [76].

MgB_2 :n kriittinen lämpötila on 39 K, siis huomattavasti korkeampi kuin NbTi:n tai Nb_3Sn :n. MgB_2 kilpailee 4 K toimintalämpötilan sovellutuksissa jo vuosikymmenien ajan kehitettyjen NbTi- ja Nb_3Sn -materiaalien kanssa. Toisaalta se sopii myös hieman korkeamman lämpötilan eli 10–27 K:n mekaanisesti jäähdytettäviin MRI-laitteistoihin, jotka eivät muilla matalan lämpötilan suprajohteilla ole toteuttamiskelpoisia. Tällaisia MRI-laitteistoja oli vuonna 2017 käytössä maailmanlaajuisesti 28 kappaletta [2]. [90]

MgB_2 on jäykkä ja hauras materiaali, joten siitä ei voida valmistaa johtimia vetämällä samoin kuin NbTi:a. Valmistusprosessiksi käy esimerkiksi PIT eli powder in tube [10]. Vaihtoehtoina ovat *in situ* ja *ex situ* PIT -menetelmät. *In situ* -PIT-menetelmässä Mg- ja B-jauheet laitetaan matriisimetalliputkeen, jossa ne lämpökäsittelyn aikana reagoivat MgB_2 :ksi. *Ex situ* -menetelmässä käytetään MgB_2 -jauhetta [24]. Matriisimetalliksi valitaan ruostumaton teräs, puhdas rauta, hiiliteräs tai nikkeli. [29, 53] Kuvassa 2.7 on kuvattu MgB_2 -monofilamenttijohtimen *ex situ* PIT-valmistusmenetelmä. Tässä valmistusmenetelmässä täytetään rauta-aihiot valmiilla suprajohtavaksi käsitellyllä MgB_2 -jauheella argon-kaasun alaisuudessa. Seuraavaksi aihiot taotaan ja vedetään 2 mm:n vahvuiseksi johtimeksi, joka valssataan ohueksi teipiksi. Myöhemmin kehitetyt ja sähkömagneettisilta ominaisuuksiltaan pa-



Kuva 2.7 MgB_2 -monofilamenttijohtimen valmistusprosessi. Mukautettu lähteestä [24].

remmat johtimet ovat myös MgB_2 -suprajohdemateriaalilla monofilamenttisia. Näiden valmistuksessa käytetään joko MgB_2 +kuorimetalli -putkia, joita upotetaan matriisimetalliin [89], tai vielä suuremman filamenttilukumäärän saavuttamiseksi leikataan jo valmistettu monofilamenttijohtin ja pinotaan uudelleen uuden kuoren sisään [62]. Parannusta kriittiseen virtaan ja -magneettikenttään on saavutettu johtimilla, joiden matriisimetalleina toimivat CuNi-lejeerinki (suhteessa 3:7) sekä puhdas kupari. Kuparia käytettäessä on tärkeää estää sen reagoiminen MgB_2 :n kanssa, esimerkiksi Nb-diffuusioesteen avulla. [62, 89]

MgB_2 :n etuina korkean lämpötilan suprajohteisiin nähden ovat yksinkertainen ke-

miallinen koostumus, halvat raaka-aineet magnesium ja boori ja vähäinen sähkömagneettinen anisotropisuus. [27, 74, 90]

2.2.6 Yhteenveto kaupallisista suprajohteista

Taulukkoon 2.1 on koottu joitakin eri suprajohteiden sähkömagneettisia ominaisuuksia. Näitä ovat kriittinen lämpötila, anisotropiakerroin, kriittinen magneettivuontiheys ja kriittinen virrantiheys. Anisotropiakertoimella tarkoitetaan tässä sitä, kuinka moninkertainen on kriittinen virta magneettikentässä, joka on johtimen suuntainen verrattuna kriittiseen virtaan johtimen altistuessa magneettikenttään, joka on kohtisuora johtimeen nähden. Virrantiheydet ovat suprajohdemateriaalisia esiintyviä virrantiheyksiä, eivätkä ota huomioon esimerkiksi stabiloivan matriisimetallin osuutta. Eniten stabilointia tarvitsevat korkean lämpötilan suprajohteet ja MgB_2 . YBCO-johdinten suprajohteen osuus koko johtimen poikkipinta-alasta on vain 1–2 %, BSCCO-johdimilla 25–40 % ja matalan lämpötilan suprajohteilla noin 40–50 %. MgB_2 -materiaalin osuus on komposiittijohtimissa tällä hetkellä luokkaa 20 %. Taulukon MgB_2 :lla korkeimman virrantiheyden $2 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ saavuttaneen johtimen suprajohdeosuus on noin 4 % koko johtimen poikkipinta-alasta [60]. [55]

Taulukko 2.1 Yhteenveto kaupallisten suprajohteiden ominaisuuksista. Lähteinä käytetty *Larbalestierin* artikkelia [55] vuodelta 2001 ja lisäksi *Bi-2212:n* kohdalla [1, 39, 56, 70, 71], *Bi-2223:n* kohdalla [50, 56, 93], *YBCO:n* kohdalla [69], *MgB₂:n* kohdalla [41, 73, 88], *Nb₃Sn:n* kohdalla [58] ja *NbTi:n* kohdalla [75].

Materiaali	T_c (K)	Anisotro- pia- kerroin	B_{c2} , (T) $T=4,2$ K	B_{irr} , (T) $T=77$ K	J_c $T=4,2$ K (A/cm ²)	J_c $T=77$ K (A/cm ²)
NbTi	9	X	12	X	$\approx 1 \times 10^5$ (7 T)	X
Nb ₃ Sn	18	X	26	X	6×10^5	X
MgB ₂	39	2–6	16	X	2×10^5	X
Bi-2212	85	X*	≈ 200	≈ 0	3×10^5	1×10^3
Bi-2223	110	50–100	> 200	0.5–0.8	1×10^5	$2,7 \times 10^4$
YBCO	90	7	≈ 150	7	1×10^7	2×10^6

Korkean lämpötilan suprajohteille tärkeä parametri on 77 K:n lämpötilassa palautumattomuuskenttä (*irreversibility field*) \vec{B}_{irr} , eli se magneettivuon tiheyden arvo, jossa kriittinen virrantiheys laskee nollaan. Tämä kenttä on paljon alhaisempi kuin ylempi kriittinen magneettivuon tiheys. Bi-2212:n anisotropiakertoimen kohdalla X* tarkoittaa, että materiaali itsessään on anisotrooppinen, mutta *state of art*-johtimet eivät ole. Valinta kaupallisten suprajohteden väliltä riippuu pääasiassa kolmesta tekijästä, jotka ovat valmistamisen helppous/hinta, magneettikenttä ja

lämpötila. Kun tarvittava magneettivuon tiheys on alle 10 T, valitaan NbTi, koska se on vaivattomin valmistaa. Kun tarvitaan noin 10–20 T, valitaan Nb₃Sn. Kun vaaditaan tätä suurempi vuontiheys, valitaan jokin korkean lämpötilan suprajohteista. Kun sovelluksen toimintalämpötilana on 77 K ja lisäksi johdin altistuu usean teslan magneettivuon tiheydelle, ainoa vaihtoehto on YBCO. Virtajohtosovellukseen sopii myös Bi-2223. Lämpötilavälille 20–30 K soveltuu useampi vaihtoehto MgB₂:sta ja YBCO:sta BSCCO:on. Sähkömagneettisten ominaisuuksien lisäksi valintakriteeriksi muodostuu hinta. [2, 78]

2.3 Transitio ja potenssilaki

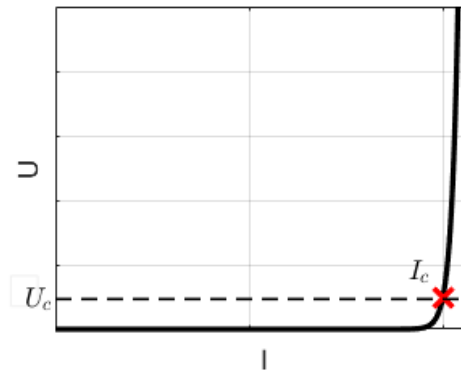
Tämä osio esittelee suprajohteen tyypillistä $V(I)$ -käyttäytymistä ja kuvaa transitiota normaalitilaan sekä LTS- että HTS-materiaalien kannalta. Lisäksi kuvataan suprajohteen lämpötasapainoa ja stabilointimenetelmiä. Lopuksi esitellään suprajohteen persistoiminen.

2.3.1 Potenssilain kuvaus ja tulkinta

Suprajohdemateriaalin jännite-virtakäyttäytymistä kuvantaa yhtälö

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n, \quad (2.5)$$

Yhtälön V on näytteen yli oleva jännite, V_c on jännitekriteeri (joko $0,1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$ tai $1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$), I näytteen kautta kulkeva virta, I_c näytteen kriittinen virta ja n transition jyrkkyyttä kuvaava parametri, joka on yleensä lukuarvoltaan 10–100. Yhtälö 2.5 on niin kutsuttu potenssilaki, jota havainnollistaa kuva 2.8. [36]

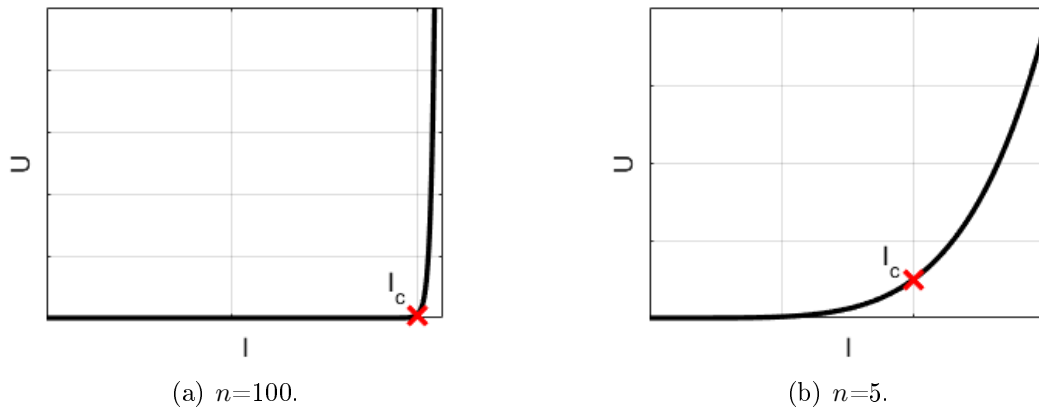


Kuva 2.8 Suprajohteen jännite-virtakäyrä. Katkoviiva havainnollistaa jännitekriteeriä.

Jännite kasvaa vähitellen virran funktiona, kun virta lähestyy kriittistä virtaa. I_c :tä suuremmalla virralla jännite nousee jyrkästi. Suurempi n -arvo tarkoittaa jyrkempää käyrää, siis äkillisempää transitiota suprajohtavasta tilasta normaalijohtavaan tilaan, jolloin pieni virranlisäys lähellä kriittistä virtaa johtaa suprajohtavan tilan menettämiseen. [36]

2.3.2 Transition vertailu eri suprajohtamateriaalien välillä

Transitio suprajohtavan ja normaalijohtavan tilan välillä korkean lämpötilan suprajohteilla poikkeaa matalan lämpötilan suprajohteista. Matalan lämpötilan suprajohteilla transitio on kuvan 2.9(a) mukaisesti jyrkkä ja n -arvo luokkaa 30–100. Selkeän transition vuoksi tyypillinen sähkökenttäkriteeri on $0,1 \frac{\mu V}{cm}$. Korkean lämpötilan suprajohteiden, esimerkiksi BSCCO:n n -arvo on matala, luokkaa 5–20, Bi-2223-johtimilla korkeampi ja Bi-2212-johtimilla matalampi [37, 64, 79].



Kuva 2.9 Transitio ja n -arvon vaikutus. Vasemmalla tyypillinen matalan lämpötilan suprajohteen ja oikealla korkean lämpötilan suprajohteen jännite-virtakäyrä. Jännitekriteeri kummallekin $0,1 \frac{\mu V}{cm}$. Mukautettu lähteestä [72].

Tämä tarkoittaa sitä, että korkean lämpötilan suprajohteilla generoituu joulelämpöä myös alikriittisillä virran arvoilla. Toisaalta kriittinen virta voidaan hetkellisesti ylittää. Suunnittelussa keskeistä onkin, kuinka paljon lämmön generoitumista voidaan sallia. Transitio on kuvan 2.9(b) mukaisesti loiva ja kriittinen virta riippuu huomattavasti käytetystä sähkökenttäkriteeristä [37]. Yleisin sähkökenttäkriteeri on $1 \frac{\mu V}{cm}$.

Toimintalämpötila vaikuttaa merkittävästi suprajohteen käyttäytymiseen, koska materiaalien ominaislämpö on vahvasti lämpötilan funktio. Esimerkiksi quench eli suprajohtavan tilan äkillinen menettäminen tapahtuu matalan ja korkean lämpötilan

suprajohteilla eri tavalla. Normaalitilaan siirtyneen alueen kasvunopeus on alhaisempi 77 K:ssä kuin 4,2 K:ssä. Lämpötilassa, joka on hieman kriittisen lämpötilan alapuolella, osa virrasta siirtyy matriisimetalliin. Tätä lämpötilaa kutsutaan virran jakautumislämpötilaksi (*current sharing temperature*). Jälleen kerran, matalan lämpötilan suprajohteilla jyrkän transition vuoksi lämpötilaväli, jolla virta jakautuu, on kapea. Sen sijaan korkean lämpötilan suprajohteilla virran jakautumista esiintyy laajemmalla lämpötilavälillä. Matalan lämpötilan suprajohde siirtyy siis käytännössä välittömästi suprajohtavasta tilasta normaalitilaan. Korkean lämpötilan suprajohdeilla 77 K:ssä virran jakautuminen on otettava huomioon quench-analyysissä, koska se vaikuttaa oleellisesti lämpötilajakaumaan.

Lisäksi normaalitilaan siirtyneen alueen laajenemisnopeus on korkean lämpötilan suprajohteilla alhaisempi kuin matalan lämpötilan suprajohteilla. Tästä johtuen hotspot-lämpötila, eli korkein paikallinen lämpötila, voi 77 K:ssä operoidessa kohota pienellä alueella huomattavasti ja vaurioittaa johdinta. Matalan lämpötilan suprajohteilla normaalialue kasvaa nopeammin, jolloin suurin lämpötilan nousu voidaan havaita ja siten ehkäistä helpommin kuin korkean lämpötilan suprajohteilla. [42]

2.4 Transition kytkentä quench-analyysiin ja stabiilisuuteen, n -arvon merkitys

Quench tapahtuu, kun johdin poistuu palautumattomasti suprajohtavasta tilasta ja aloittaa resistiivisen lämmöntuotannon. Johdin voi vaurioitua sekunnin murto-osassa quenchin alkamisesta. Siispä quenchin havaitsemiseen ja virran poiskytkentään tarvitaan automatisoitua järjestelmää. Suprajohtava tila on luonteeltaan epästabiili, joten käytännön sovelluksia varten suprajohtava materiaali täytyy ympäröidä matriisimetallilla. Stabilointimenetelmistä kryogeeninen stabilointi ja adiabaalinen stabilointi esitellään tässä luvussa. [18]

2.4.1 Quench

Quenchissa suprajohdelanka lämpenee paikallisesti. Häiriö, kuten johtimen liike voi aiheuttaa tällaisen lämpenemän. Kun suprajohdelangan osassa suprajohtava tila menetetään, materiaali muuttuu normaalijohteiseksi. Suprajohdemateriaalit ovat normaalitilassa paljon huonompia sähkön- ja lämmönjohteita kuin hyvät johteet kuten kupari. Siispä suprajohdelangan kuljettama virta aiheuttaa suuren resistiivisen häviön normaalijohtavassa tilassa olevaan supramateriaaliin. Johdin kuumenee paikallisesti voimakkaasti ja resistiivinen alue kasvaa. [19]

Stabiiloinnin tavoitteena on varmistaa järjestelmän luotettava toiminta. Stabiilisuu-den tarkasteluun soveltuu tehotasapainoyhtälö, joka on [43]:

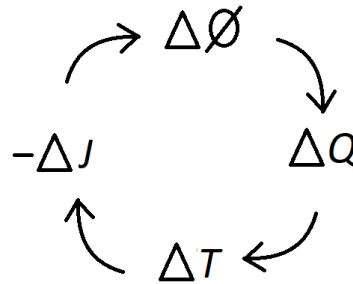
$$C_{cd} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{cd} \nabla T) + \rho_{cd} J_{cd}^2 + g_d - g_q, \quad (2.6)$$

jossa C_{cd} on johtimen lämpökapasiteetti, joka sisältää sekä suprajohdemateriaalin että matriisimetallin lämpökapasiteettitermit. $\frac{\partial T}{\partial t}$ on lämpötilan osittaisderivaatta ajan suhteen. k_{cd} on johtimen lämmönjohtavuus ρ_{cd} on johtimen resistiivisyys normaalitilassa ja J_{cd} on johtimen virrantiheys. g_d on häiriön energiatiheys, joka syntyy esimerkiksi johtimen liikkeestä tai eristemateriaalin murtumisesta tai vuonhyppytystä, jotka selitetään myöhemmin tässä luvussa. g_q on jäähtymisen energiatiheys, esimerkiksi energian siirtyminen helium-jäähtytysaineeseen tai mekaanisen jäähtytyslaitteen tuottama jäähtytys. [4]

Yhtälön vasen puoli kuvaa suprajohdemateriaalin sisäenergian muutosta ajan suhteen ja oikean puolen ensimmäinen termi kuvaa johtumislämpövuota. Toinen termi kuvaa materiaalissa generoituvaa Joule-lämpöä, joka suprajohtavassa tilassa olevalla materiaalilla on nolla ja suprajohtavan tilan menetyksen jälkeen matriisimetallissa generoituvaa lämpöä. Kolmas termi kuvaa siis häiriötä, joka voi olla esimerkiksi johtimen liikkeestä syntyvää lämpöä ja viimeinen termi jäähtytystä.

2.4.2 Vuonhyppy

Yksi epästabiiliisuuden aiheuttajista on vuonhyppy. Vuonhyppy voi johtaa suprajohtavaan magneettiin varastoituneen energian dissipoitumiseen lämpöenergiaksi ja magneetin quenchamiseen. Kuva 2.10 esittää vuonhypyn mekanismia.



Kuva 2.10 Vuonhyppy. Muutos magneettivuossa $\Delta\phi$ aikaansaa lämmön generoitumista ΔQ , joka aikaansaa lämpötilan nousun ΔT ja tämä aiheuttaa virrantieyden laskun $-\Delta J$, ja niin edelleen. Muokattu lähteestä [94].

Vuonhyppyjä esiintyy kaikissa lajin II suprajohteissa ja sen voi ymmärtää esimerkiksi

seuraavalla tavalla: Ensin suprajohde altistetaan magneettikentälle. Magneettikentän kasvu johtaa suojavirtojen kasvuun suprajohteen pinnassa. Magneettivuo tunkeutuu Londonin tunkeutumissyvyyden pituiselle matkalle. Magneettivuon muutos generoi lämpöä, mikä johtaa suprajohteen lämpötilan paikalliseen nousuun. Lämpötilan nousu laskee kriittistä virtaa tai pinning-voimaa. Tämä edelleen johtaa magneettivuon pienenemiseen tai vuoputkien liikkeeseen. Magneettivuon muutos tai vuoputken liike generoi lämpöä. [83, s. 139–140], [94]

2.4.3 Kryogeeninen stabiilisuus

Varhaisilla yritelmillä valmistaa suprajohtavasta materiaalista sähkömagneetti ha-
vaittiin pian, että suprajohtava tila menetettiin paljon alemmalla virralla, kuin mi-
tä lyhyillä, suorilla näytteillä saatujen testitulosten perusteella odotettiin [16]. En-
simmäinen menestyksenkäs stabilointimenetelmä oli kryogeeninen stabilointi, jonka
myötä magneeteilla päästiin lähemmäs *short sample*-arvoja [86].

Kryostabiloidussa magneetissa johdin ympäröidään hyvin sähköä ja lämpöä joh-
tavalla metallilla, esimerkiksi kuparilla, johon virta siirtyy kun suprajohtava tila
menetetään. Tämä kuparimatriisi toimii siis vaihtoehtoisena kulkureittinä virralle,
kuten rinnan kytketyillä vastuksilla. Tavoite on, että matriisimetallissa generoitunut
Joule-lämpö on likipitään yhtäsuuri kuin jäähdystysteho, siis $\rho_{cd}J_{cd}^2 \simeq g_q$ [42].

Kryogeenisen stabiilisuuden kriteeri voidaan esittää myös Steklyn parametrin α_{Stekly}
avulla. Magneetti on kryogeenisesti stabiili, jos $\alpha_{\text{Stekly}} < 1$ yhtälössä

$$\alpha_{\text{Stekly}} = \frac{\rho_n I^2}{hPA(T_c - T_{op})}, \quad (2.7)$$

jossa ρ_n on johtimen keskimääräinen normaalitilan resistiivisyys, I on johtimen kaut-
ta kulkeva virta, h on lämmönsiirtokerroin jäähdytysnesteeseen, P on jäähdytysai-
neen kanssa kosketuksessa oleva johtimen osa, T_c on kriittinen lämpötila ja T_{op} on
toimintalämpötila, yleensä nesteheliumin lämpötila. Yhtälö voidaan kirjoittaa uu-
delleen komposiittijohtimelle, jossa suprajohtavan materiaalin osuus johdinpinta-
alasta on λ ja matriisimetallin osuus $1 - \lambda$, siis muodossa

$$\alpha_{\text{Stekly}} = \frac{\lambda^2 j_c^2 \rho A}{hP(1 - \lambda)(T_c - T_{op})} < 1. \quad (2.8)$$

Tässä muodossa yhtälöstä voi nähdä, että suuri matriisimetallin osuus verrattuna
suprajohdemateriaaliin tekee johtimesta stabiilin quenchia vastaan.

Steklyn kriteerin täyttävä johdin pystyy aina palautumaan häiriön aiheuttamas-

ta paikallisesta normaalitilasta takaisin suprajohtavaan tilaan [94]. Kryostabiilissa magneetissa huomattava osa virrasta voi kulkea kuparimatriisin kautta, ilman että magneetin sähkömagneettinen toiminta muuttuu [86]. Toisaalta suuri osuus matriisimetallia laskee koko johtimen virrantiheyttä ja kasvattaa sen kokoa ja painoa.

2.4.4 Adiabaattinen stabiilisuus

Adiabaattisessa stabiloinnissa suprajohtomateriaali jaetaan pieniksi säikeiksi eli filamenteiksi. Tämän osajaon ensimmäinen hyöty on, että se rajoittaa matkaa jonka vuoputki pystyy suprajohtebulkissa liikkumaan. Täten myös magneettisen häiriön vuoksi vapautuva lämpöenergia pienenee. [94]

Toinen hyöty osajaossa on jäähdtyksen tehostuminen. Suprajohteilla on alhainen lämmönjohtavuus, joten vuonhyppyjä täytyy tarkastella adiabaattisena prosessina. Moneen pieneen filamenttiin jaettuna ja hyvään johteeseen upotettuna vuon liikkeen tuottama lämpö voidaan johtaa pois hyvään lämmönjohteeseen eli matriisimetalliin ja sitä kautta jäähdtyksnesteeseen. Kun adiabaattisen stabiilisuuden kriteeri täytetään, kuvan 2.10 mukainen itseään vahvistava ketjureaktio vaimenee, eikä johdin menetä stabiilisuuttaan. Yhtälön 2.6 oikean puolen ensimmäinen termi, eli lämpövirta pois suprajohteesta ja viimeinen termi eli jäähdtysteho approksimoidaan adiabaattisessa tilanteessa mitättömiksi. Lisäksi vasemman puolen lämpökapasiteettitermi sisältää vain suprajohtomateriaalin lämpökapasiteetin, sillä lämpöä ei oleteta siirtyvän. Lämmön generoituminen voi nostaa hetkellisesti suprajohteen lämpötilaa, mutta lämmön nousun on jäätävä matalan lämpötilan suprajohte- eli LTS-materiaaleilla enintään 1 K:iin 4,2 K:n toimintalämpötilassa [43].

Adiabaattiselle stabiilisuudelle voidaan määritellä parametri β [51, s. 458]

$$\beta = \frac{\mu_0 J_c^2 a^2}{C \Delta T}, \quad (2.9)$$

jossa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, J_c on kriittinen virrantiheys, a on suprajohtekappaleen leveyden puolikas, C on lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti, ΔT on kriittisen lämpötilan ja toimintalämpötilan erotus. Johdin on adiabaattisesti stabiili, kun $\beta < 3$. Adiabaattisen stabiilisuuden kriteeri suprajohtefilamentin halkaisijan puolikkaalle a voidaan kirjoittaa muodossa [44, 51, s. 338, ss. 458–459]

$$a = \sqrt{\frac{\beta C_{avg} \Delta T}{\mu_0 J_c^2}}, \quad (2.10)$$

jossa C_{avg} on keskimääräinen lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti lämpötila-

välillä ΔT , joka on kriittisen lämpötilan ja toimintalämpötilan erotus. Esimerkiksi sijoittamalla NbTi-johtimelle tyypilliset arvot $J_c = 3 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$, $C = 6 \frac{\text{kJ}}{\text{K m}^3}$, $\Delta T = 5 \text{ K}$ ja $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$, saadaan a :n arvoksi $89 \mu\text{m}$.

2.4.5 Stabiilisuus ja HTS

LTS-johtimien suunnittelussa stabiilius on avainasemassa, sillä pienetkin häiriöt, kuten johtimen liike, voivat johtaa paikallisesti suprajohtavan tilan menetykseen. HTS-johtimien entalpia- ja lämpötilamarginaalit ovat sen sijaan kertaluokkaa suurempia. Ne ovat siten sangen stabiileja ulkoisille häiriöille. Pienin quenchin aiheuttava energia on useita kertaluokkia suurempi HTS-johtimille kuin LTS-johtimille. [78]

Korkean lämpötilan suprajohteilla se lämpötilannousu, joka ei vielä johda suprajohtavan tilan menetykseen, on luokkaa 10 K , kun taas matalan lämpötilan suprajohteilla se on luokkaa 1 K . Korkean lämpötilan suprajohteilla ominaislämpö 77 K :ssä on luokkaa $1000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$, kun taas matalan lämpötilan suprajohteen, kuten NbTi:n ominaislämpö $4,2 \text{ K}$:ssä on luokkaa $0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$. Stabiiloivan kuparin ominaislämpö 77 K :ssä on luokkaa $2000 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$, kun taas $4,2 \text{ K}$:ssä se on luokkaa $1 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \text{K}}$. Näiden lukuarvojen perusteella voidaan arvioida, että suurin sallittu energiatiheys, jonka suprajohtava materiaali sietää ilman suprajohtavan tilan menettämistä, eli $C_m \Delta T$, jossa C_m on lämpökapasiteetti tilavuusyksikköä kohti ja ΔT lämpötilamarginaali, on korkean lämpötilan suprajohteilla noin $20\,000$ -kertainen matalan lämpötilan suprajohteiden vastaavaan. [42]

Jäähdytysaine nestetypen latenttilämpö on noin $160 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$, kun taas nesteheliumin vastaava on vain $2,6 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$. Sama lämpökuorma höyrystää siis yli 60 -kertaisella nopeudella nesteheliumia nestetyppeen verrattuna. [19, s. 505]

Toisaalta matriisimetallin sähkönjohtavuus heikkenee korkeampaan toimintalämpötilaan siirryttäessä, jolloin johtimen normaalitilan resistanssi on suurempi. Tämä aiheuttaa normaalitilan suuremman lämmön generoitumisen ja korkeamman jännitteen johtimen yli. Kuparin resistiivisyys $4,2 \text{ K}$:ssä on noin $0,2 \text{ n}\Omega \text{ m}$, kun taas 77 K :ssä se on noin kertaluokan suurempi eli $2,1 \text{ n}\Omega \text{ m}$. [19, s. 542]

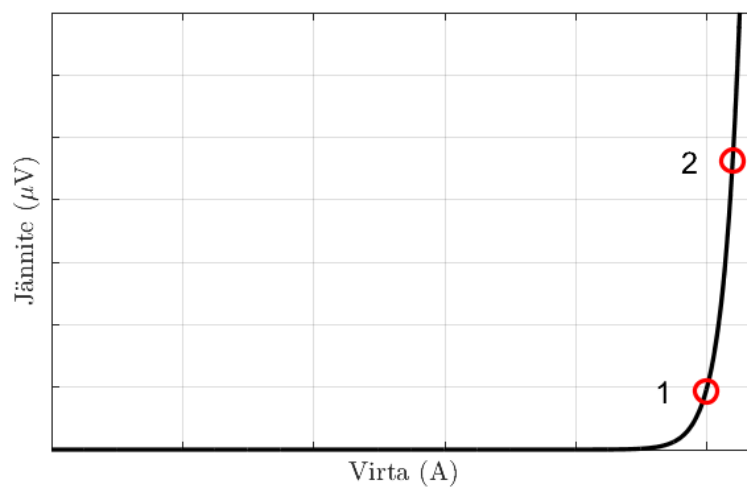
Yhteenvetona korkean lämpötilan suprajohteet ovat tasavirtasovelluksissa täysin stabiileja ulkoista häiriötä, kuten liikettä tai vuonhypyn aiheuttamaa lämpökuormaa vastaan. Korkean lämpötilan suprajohteista valmistetuilla magneeteilla ei saavuteta hyötyjä kryogeenisellä stabiilisuudella, vaan stabilointi toteutetaan täyttämällä adiabaattisen stabiilisuuden kriteeri. [42],[44, s. 358]

2.4.6 n -arvo

Transitio suprajohtavasta tilasta normaalijohteiseen tilaan noudattaa potenssilain, yhtälön 2.5 mukaista käyrää, jossa n -arvo kuvastaa transition jyrkkyyttä. Yleinen tapa määrittää n -arvo, on laskea se yhtälöstä [44, s. 458]

$$n = \frac{\ln(V_2/V_1)}{\ln(I_2/I_1)}, \quad (2.11)$$

jossa V_1 ja I_1 ovat kuvan 2.11 mukaisesti $V(I)$ -käyrän jännite ja virta pisteessä 1 ja V_2 ja I_2 jännite ja virta pisteessä 2.



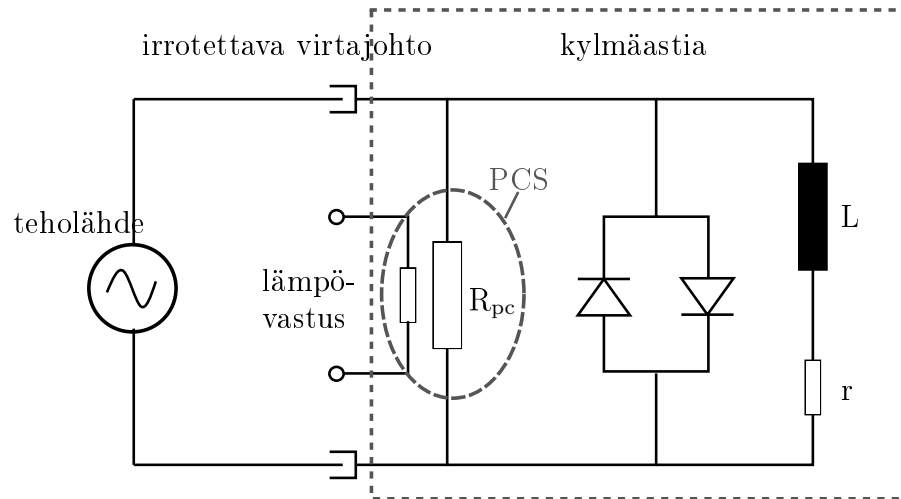
Kuva 2.11 Esimerkkikuva n -arvon määrittämisestä yhtälön 2.11 avulla. Mukautettu lähteestä [44]

Mitä jyrkempi transito on, sitä korkeampi on n -arvo. n -arvon perusteella voidaan myös arvioida komposiittijohtimen (jossa suprajohtefilamentit ovat upotettuna matriisimetalliin) homogeenisuutta. Suurempi homogeenisuus edesauttaa virran jakautumista tasaisemmin filamenttien kesken, mikä parantaa johtimen suorituskkyä. Korkea n -arvo vaaditaan magneettisovelluksiin. [21, 36, 79]

2.5 Persistointi ja MRI-laitteet

Tämä osio esittelee suprajohteiden kaupallisesti tärkeintä sovellusaluetta, eli persistoituja MRI-magneetteja. $V(I)$ -mittauksen kohteena olevat johtimet valmistetaan aina ennalta suunniteltuun tarkoitukseen, joka suurimmalle osalle vuosittain tuotetusta suprajohtimista on magneettikuvauslaitteen kentän tuottaminen. $V(I)$ -mittauksella todennetaan johtimen kelpoisuus ja arvioidaan sen stabiilisuusmarginaaleja. Persistoinnissa magneetin navat kytketään virtalähteeseen ja siihen ajetaan

virtaa. Kun magneetti on ladattu, sen navat oikosuljetaan sulkemalla suprajohtava kytkin (*persistent current switch*). Tähän käyttöön soveltuvaa piiriä havainnollistaa kuva 2.12. Virtalähde voidaan kytkeä pois päältä ja virta jää kiertämään suprajohtavaan magneettiin käytännössä vaimenematta. Iwasan mukaan [44, s. 21, 455] todellisuudessa pieni resistanssi sallitaan, kunhan magneettikenttä vaimee hitaammin kuin 0,01 ppm tunnissa. Tällöin vaimenemisen aikavakio, eli aika, johon mennessä magneettikenttä on vaimentunut $1/e$ -osaan alkuperäisestä eli noin 36,8 %:iin, on noin 11 000 vuotta. [44, s. 21, 455]



Kuva 2.12 Yksinkertainen piirikaavio persistoidulle magneettikytkennälle. PCS esittää persistointikytkintä, L kuvantaa magneetin induktanssia, r koko kytkennän resistanssia ja R_{pc} persistointikytkimen resistanssia. Mukautettu lähteestä [44, s. 455].

Persistoituja supramagneetteja hyödyntävät esimerkiksi suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) ja MRI (*Magnetic Resonance Imaging*), jota toisinaan kutsutaan nimellä NMRI (*Nuclear Magnetic Resonance Imaging*). Suomeksi MRI:stä käytetään nimitystä magneettikuvaus. Se on suprajohtavuuden sovellutuksista ehkä tunnetuin ja myös kaupallisesti tärkein. SMES-sovellutuksessa magneetti toimii sähkömagneettisen energian varastona. SMES voidaan ladata ja purkaa nopeasti ja se soveltuu sähkön laadun parantamiseen sekä jakelukeskeytysten paikkaamiseen. [7, 78]

2.5.1 Magneettinen vaimeneminen persistoidussa magneetti-piirissä

Yhtälö 2.5 kuvantaa suprajohteen jännite-virtakäyttäytymistä. Tarkastellaan suprajohtetta, jolla on tunnettu n -arvo. Koska magneettikenttä ei ole kaikkialla sama, voi kriittinen virta olla korkeintaan se virta, joka saavutetaan suurimman kentän alueella käämin sisäpinnalla. Tarkastelu voidaan kohdistaa tälle alueelle ja matalamman

kentän alueelle jäävät osat voidaan jättää huomioimatta, koska niillä virtamarginaali on suurempi. Tarkastellaan jännitteen nousua potenssilain mukaisesti sillä osalla johdinta, joka on suurimman magneettikentän alueella ja merkitään tämän johdinosan pituulla symbolilla l_{mx} . Jännite ratkaistaan integroimalla yhtälö 2.5 pituuden l_{mx} yli, jolloin saadaan Iwasan mukaan [44, s. 457]:

$$V_n = E_c \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n l_{mx}. \quad (2.12)$$

Virran vaimenemista persistoidussa magneetissa kuvaa yhtälö [44, s. 457]:

$$\frac{dI_{op}}{dt} = -\frac{V_n}{L_m} = -\frac{E_c}{L_m} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n l_{mx}. \quad (2.13)$$

Virta I_{op} ja magneettikentän voimakkuus H_0 ovat suoraan verrannollisia ja tästä johtuen voidaan kirjoittaa [44, s. 457]

$$\frac{dH}{dt} \equiv -\frac{\Delta H}{\tau} \propto -\frac{E_c}{L_m} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n l_{mx}, \quad (2.14)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0 \tau} = \frac{E_c}{L_m I_{op}} \left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)^n l_{mx}, \quad (2.15)$$

jossa $\frac{\Delta H}{H_0 \tau}$ on magneettikentän suhteellinen vaimenemisnopeus $1 \times 10^{-8} \text{ h}$ ja τ on magneettisen vaimenemisen aikavakio $\frac{L}{r}$, joka Iwasan mukaan [44, s. 457] soveltuu persistoidulle magneettikytkennälle. Ratkaisemalla termi $\left(\frac{I_{op}}{I_c} \right)$ yhtälöstä 2.15 saadaan

$$\frac{I_{op}}{I_c} \leq \left[\frac{L_m I_{op}}{E_c l_{mx}} \left(\frac{\Delta H}{H_0 \tau} \right) \right]^{1/n}, \quad (2.16)$$

joka kuvaa suurinta sallittua virran ja kriittisen virran suhdetta persistoidussa tilassa.

2.5.2 Esimerkki persistoidusta magneettipiiristä

Kuva 2.12 esittää yksinkertaista suprajohtavan magneetin piirikaaviota persistointikytkimellä. L kuvantaa magneetin induktanssia. Ideaalitilanteessa koko piirin resistanssi r on nolla. Persistointikytkin PCS (*persistent current switch*) on kytketty virtalähteen rinnalle ja virtalähteen voi irrottaa piiristä, kun virta kulkee persistointikytkinhaaran kautta. Diodikytkennän tehtävänä on suojata magneettia quenchin varalta.

Katkoviivalla rajattu piirin osa on sijoitettu kryostaatin sisälle ja rajatun alueen ulkopuolinen osa huoneenlämpöön. Kun virtaa syötetään piiriin, on persistointikytkin resistiivinen, koska sitä pidetään vastusta lämmittämällä normaalitilassa. Kun toimintavirta on saavutettu, voidaan kytkimen lämpötilan antaa laskea, jolloin vastus R_{pc} häviää. Samoin virransyöttö voidaan katkaista. Iwasan mukaan [44, s. 456] virtalähteen nyt virrattomat johtimet kytketään yleensä irti, jolloin lämmön johtuminen niitä pitkin huoneenlämmöstä magneettipiiriin saadaan eliminoidua ja joissakin tapauksissa johtimet vedetään kokonaan pois kryostaatista, jolloin lämpöä ei johdu niitä pitkin lainkaan kylmäastiaan. [44, s. 456]

2.5.3 Suprajohteen resistiivisyys ja kriittinen virta, n -arvo

Tämä osio sisältää esimerkkilaskelman jonka tarkoituksena on havainnollistaa n -arvon merkitystä suprajohtavan magneetin resistiivisyyteen ja maksimivirtaan. Aiemmin tässä työssä mainittiin, että johtimen n -arvon täytyy persistoiduissa magneettisovelluksissa olla vähintään 30. Tämän osion esimerkkien tehtävänä on muun muassa tarkastella, onko tämä vaatimus perusteltu. Lisäksi tarkastellaan, onko n -arvolle olemassa ns. ylärajaa, jonka jälkeen sen kasvattamisella ei saavuteta enää hyötyä.

Tämän esimerkin lähtökohtana on magneettisen vaimenemisen raja, jona käytetään usein arvoa 0,01 ppm/h [78]. Esimerkkimagneetin konfiguraatioksi valitaan solenoidimagneetti sen yksinkertaisuuden vuoksi. Kiinnitetään induktanssiksi $L_m = 10$ H, käämin kierrosten lukumääräksi $N = 8921$, sisäsäteeksi $a_1 = 0,1$ m, ulkosäteeksi $a_2 = 0,16$ m ja siten ulkosäteen ja sisäsäteen suhteeksi saadaan $\alpha = 1,6$ ja korkeuden ja sisähalkaisijan suhteeksi $\beta \approx 1.05$. Muotokerroin $L(\alpha, \beta)$ on dimensioton suure, joka riippuu vain solenoidimagneetin muodosta. Muotokerroin vaikuttaa käämin itseinduktanssiin, joka solenoidikäämille määritellään yhtälöllä

$$L_m = \mu_0 a_1 N^2 L(\alpha, \beta). \quad (2.17)$$

Se saadaan taulukosta [44, s. 107] ja on valitulla α :n ja β :n yhdistelmällä $L(\alpha, \beta) = 1$. Solenoidimagneettiin tarvittavan johtimen pituus l_x saadaan yhtälöstä [44, s. 174]

$$l_x = N\pi a_1(\alpha + 1). \quad (2.18)$$

Sijoittamalla edellä valitut lukuarvot saadaan johdinpituudeksi noin 7300 m. Sijoitetaan vielä yhtälöön 2.16 lukuarvot

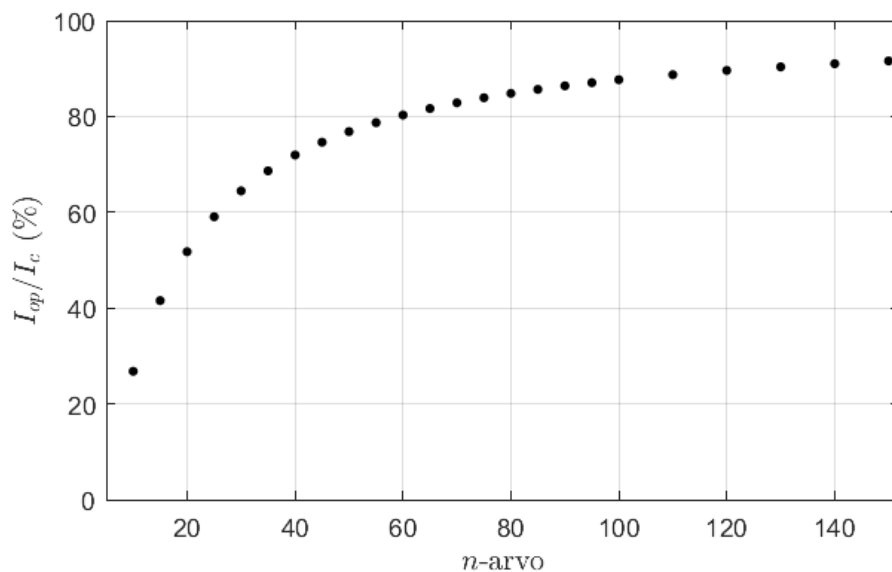
$$L_m = 10 \text{ H}, \quad (2.19)$$

$$I_{op} = 500 \text{ A}, \quad (2.20)$$

$$E_c = 10 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}, \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta H}{H_0 \tau} = 2,78 \times 10^{-12} \frac{1}{\text{s}} \quad (2.22)$$

Lisäksi korkean kentän alueella arvioidaan olevan 10 % koko johdinpituudesta. Tämän esimerkkimagneetin suurin sallittu käyttövirran ja kriittisen virran suhde on esitetty kuvassa 2.13. n -arvoilla alle 30 joudutaan toimintavirtaa laskemaan huomattavasti.



Kuva 2.13 n -arvon vaikutus käyttövirran ja kriittisen virran suhteeseen persistoidulla esimerkkimagneetilla.

Kun n -arvo on 40, $\frac{I_{op}}{I_c} \leq 72\%$, n -arvolla 60 enintään 80 % ja n -arvolla 100 jopa 88 %. Tällä menetelmällä saadut tulokset ovat yhteneviä kirjallisuudessa esitettyjen tulosten kanssa [78]. Esimerkin perusteella n -arvon kasvattamisella saavutetaan eniten hyötyä noin lukuarvoon 80–100 asti, mutta sen jälkeen virtaa ei merkittävästi voida kasvattaa.

2.5.4 MRI-laitteet

Magneettikuvaus on johtava teknologia pehmytkudosten korkean resoluution diagnostiikkaan. Maailmalla on yli 35 000 suprajohtavuuteen perustuvaa magneettikuvauslaitetta ja vuosittain määrä kasvaa yli 3 000 yksikön verran [78]. Se on röntgenkuvausta turvallisempi, koska potilas ei altistu ionisoivalle säteilylle. Lisäksi magneettikuvauksella voidaan tarkastella kaikenlaisia kudoksia.

MRI:hin tarvittava magneettikenttä voidaan (ainakin teoriassa) tuottaa kolmella periaatteeltaan erilaisella menetelmällä. Yksi vaihtoehto on käyttää resistiivisiä sähkömagneetteja, eli teknologiaa, joka oli yleisin magneettikuvauksen alkuvuosina. Sen huono puoli ovat suuret tehohäviöt, joskin kyseisten laitteiden asentaminen on suprajohtavuuteen perustuvia laitteita yksinkertaisempaa. Toinen vaihtoehto on kesto-
magneeteille perustuva laite. Sen ongelmia ovat suuri paino, alhainen vuontiheys ja kentän epähomogeenisuus ja vaihtelevuus. Lisäksi kentän säädettävyys on huono. Näistä syistä kuvan laatukin on huono. MRI-laitteiden tarvitsema magneettikenttä tuotetaan nykyisin suprajohtavilla magneeteilla. Näiden ominaisuudet ovat ylivertaiset kahteen ensimmäiseen vaihtoehtoon nähden. Kentän homogeenisuus on parempi, sähkönkulutus rajoittuu jäähdytyslaitteiston energiankulutukseen, eikä tehohäviöitä synny. [9]

Modernit MRI-laitteet tuottavat tavallisesti 1,5 tai 3 T:n vuontiheyden. Lisäksi on käytössä alle 1,5 T:n laitteita, jotka rakennetaan avoimiksi ja siten potilasystävällisemmiksi kuin korkeamman vuontiheyden laitteet. Myös yli 3 T:n vuontiheyden laitteet yleistyvät. Niiden kuvauskohteita ovat aiemmin olleet lähinnä aivot, mutta nykyään myös sydän, raajat, eturauhanen ja rinnat. [14]

3. $V(I)$ -MITTAUKSEN KUVAUS

Suprajohteen jännite-virtamittaus on rutiininomainen toimenpide jokaiselle valmistetulle johtimelle. Näyteosa kaikista valmistetuista johdinyksiköistä testataan laadun varmistamiseksi. Käytetty suprajohdemateriaali määrittää kriittisen lämpötilan ja magneettikentän, mutta kriittinen virta ja n -arvo riippuvat johtimen valmistus- ja käsittelytavasta, joten niitä ei voida tarkasti tietää ilman mittauksia. [34]

Kriittisen virran määrittämiseen on suositeltua käyttää tasavirtamenetelmää. Jos virtakontaktien resistanssi on suuri tai näyte epästabiili, voidaan käyttää pulssitetua jännite-virtamittausmenetelmää. Siinä virta ajetaan nopeasti nolasta halutulle tasolle ja takaisin alas nolalle ennen kuin lämpö ehtii johtua virtakontakteilta jännitekontakteille. Tasavirtamenetelmässä virtaa johdetaan suprajohteeseen ja sen yli oleva jännite mitataan. Suprajohteen jännite-virta-ominaiskäyrä mitataan kirjaamalla jännite virtaa kasvatettaessa. Tyypillisesti ulkoinen magneettikenttä ja lämpötila pyritään pitämään vakiona mittauksen ajan. Jos mittaus on onnistunut, tuotettu kuvaaja noudattaa yhtälön 2.5 mukaisesti potenssilakia. Mittaustuloksia analysoidaan näytteen kriittisen virran ja n -arvon selvittämiseksi. [33]

3.1 $V(I)$ -mittauksen historia

Tämä osio käsittelee lyhyesti $V(I)$ -mittauksen historiaa. Tavoitteena ei ole kattava esitys kaikista tapahtumista, vaan joitakin keskeisiä edistysaskelia valottava katsaus.

3.1.1 Varhaiset mittaukset (1914–1940)

Ensimmäiset suprajohtavasta materiaalista valmistetun langan kriittisen virran ja magneettivuon tiheyden mittaukset suoritti Leidenin yliopiston laboratorio Heike Kamerlingh Onnesin johdolla ja niitä tulkitse Silsbee vuonna 1916 [85]. Materiaaleina olivat elohopea, lyijy ja tina. Kriittinen virta ja magneettivuontiheys kasvoivat lämpötilan laskiessa. Suurin kriittinen virta 4,2 K:ssä oli 9 A lyijystä valmistetulla johtimella, mikä vastasi $680 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$ virrantiheyttä. Lisäksi Silsbee päätteli kriittisen

magneettikentän olemassaolon. Lyijystä ja tinasta valmistettuja käämejä testattaessa ilmeni, että käämin kriittinen virrantiheys jäi murto-osaan lyhyen ja suoran näytelangon virrantiheydestä [16].

Kaksikymmentä vuotta myöhemmin, mutta edelleen Leidenissa, Keesom mittasi PbBi-yhdisteen sähkömagneettisia ominaisuuksia. Hänen näytteensä, joka oli halkaisijaltaan 0,3 mm, saavutti 23 A:n virran omakentässä ennen tuhoutumistaan. Lisäksi 0,05 T:n ulkoisessa magneettikentässä sille määritettiin 11,2 A:n kriittinen virta. [47]

Samoihin aikoihin Shubnikov havaitsi lajin II -suprajohteille tyypilliset alemman ja ylemmän magneettikentän voimakkuuden. Hän totesi, että näytteen yli oleva jännite pysyi nollassa ylempään kriittiseen magneettikentän voimakkuuteen asti. Kriittinen virta testatuilla näytteillä oli se virta, joka tarvittiin tuottamaan H_{c1} :n suuruinen magneettikenttä. [84]

3.1.2 Materiaalien ja magneettien kehitys (1950–1970)

Ensimmäisen suprajohtavan magneetin valmisti Yntema vuonna 1954. Hän käytti Nb-johdinta rautasydämen ympärillä ja hänen johtimensa virrantiheys ylsi $74 \frac{\text{kA}}{\text{cm}^2}$:n. Johtimen kriittinen virta oli 1,82 A ja se pystyi tuottamaan 0,7 T:n magneettivuon tiheyden. Jännite pysyi nollassa, kunnes parin ampeerin kohdalla se alkoi nousta lineaarisesti muutaman ampeerin lisäyksen verran, jonka jälkeen jännitteen nousu oli jyrkkää. [6, 98]

Vuonna 1961 havaittiin [5] NbZr-näytteellä $1 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$:n virrantiheys 3 T:n magneettivuon tiheydellä. Jännitekontaktien etäisyytenä oli vain 0,7 cm. Jännitekriteerinä käytettiin yleisesti [15] pienintä sen aikaisilla mittalaitteilla havaittavissa olevaa jännitettä, joka oli osalla mittauksista niinkin korkea kuin 0,25 μV . Tämä vastaa noin $0,36 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$:n sähkökenttäkriteeriä. Niinpä yli $2 \times 10^5 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$:n virrantiheydellä tapahtunut suprajohtavan tilan menettäminen aiheutti näytteiden välittömän tuhoutumisen.

Samana vuonna Kunzler [54] määrittä Nb₃Sn-näytteille korkeita kriittisiä magneettivuon tiheyksiä ja virrantiheyksiä. Hän ilmoitti jännitemittarinsa herkkyydeksi 1×10^{-8} nV. Jännitekriteerinä toimi pienin havaittavissa oleva jännite. Edelleen vuonna 1961 määritettiin NbTi-näytteelle $5000 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$:n kriittinen virrantiheys [6], mutta materiaali unohdettiin noin vuodeksi, koska sitä ei pidetty kaikista lupaavimpana materiaalina.

Kim [49] määrittä vuonna 1965 $V(I)$ -käyriä NbTa- sekä PbIn-näytteille ja päätteli, että resistanssin ilmeneminen virtaa kasvatettaessa aiheutuu vuovirtajännitteestä

(*flux flow voltage*). Lisäksi tulokset tukivat aikaisempaa teoriaa pinning-voiman ja Lorentz-voiman erotuksen vaikutuksesta vuoputkien liikkeeseen. Hänen mittauksensa sisälsivät dataa $\text{Nb}_{0.9}\text{Ti}_{0.1}$ -yhdisteen lämpötilan ja magneettikentän vaikutuksesta resistiivisyyteen.

Vuonna 1965 Stekly esitteli kryogeenisesti stabiilin suprajohtavan NbZr-magneetin. Hän käytti yhdeksää kuparilla stabiloitua suprajohdelankaa, joista kahdeksan kuljetti virtaa koko matkalla. Ensi kertaa käämin kriittinen virta, 710 A, oli lähellä samasta johtimesta valmistetun lyhyen näytteen arvoa. Steklyn magneetille määritetty $V(I)$ -käyrä muistuttaa jo paljon nykyisillä stabiloiduilla johtimilla saatavia mittaustuloksia ja se on täysin reversiibeli. [86]

3.1.3 Standardien kehitys ja suprajohteiden kaupallistuminen (1970–1990)

Suprajohteiden standardien kehitystyö alkoi Japanissa ja Yhdysvalloissa 1970-luvun lopulla [25]. Standardien tarkoituksena oli yhtenäistää määritelmät kriittisille parametreille, käytettävät mittalaitteet ja mittausten menetelmät. Yhtenä standardin tavoitteena oli jännitteeseen tai resistiivisyyteen perustuva yhtenäinen kriteeri kriittisen virran määrittämiseksi. Esimerkiksi Fujiin mukaan [26] Japanissa oli kahdeksan valmistajaa, joista jokaisella oli omat kriteerinsä käytössä. Resistiiivisyyskriteereistä oli käytössä $1 \times 10^{-10} \Omega \text{ cm}$ ja $1 \times 10^{-12} \Omega \text{ cm}$. Jännitekriteeri valittiin mittalaitteiden herkkyyden ja jännitekontaktien etäisyyden perusteella. Näitä vastaavia sähkökenttäkriteereitä oli käytössä 0.007–0.01, 0.3, 0.33, 1.67, 2.5, 5 ja $100 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$. Kahden valmistajan antamista tiedoista sähkökenttäkriteeriä ei voinut määrittää, koska ne ilmoittivat ainoastaan jännitekriteerin ilman jännitekontaktien etäisyyttä. Näytegeometrioina käytössä olivat U-muoto, suora lyhyt johdin, hiuspinnan muotoinen päistään kiinnitetty johdin ja käämi.

n -arvon historia alkaa vuodesta 1970, jolloin Voelker [91] havaitsi osamäärän $\frac{\log(\rho)}{\log(J)}$ muuttuvan vain vähän suurella virran ja magneettikentän vaihteluvälillä, mutta olevan eri suuruinen eri johtimilla, kun ρ on materiaalin resistiivisyys ja J virrantiheys. Testatun monofilamenttijohtimen resistiivisyys oli verrannollinen virrantiheyden 100:nteen potenssiin. Monofilamenttisilla johtimilla transito oli loivempi ja niille hän ehdotti resistiivisyyskriteerin $\rho = 10^{-12} \Omega$ käyttöä kriittisen virran määritelmäksi. Vuonna 1978 Ekin käytti ensimmäistä kertaa eksponenttia n resistiivisenä transitioparametrinä, jota hän kutsui myös materiaaliveikoksi [20]. Sen määritelmä oli yhtälö

$$\rho = kJ^n, \quad (3.1)$$

jossa k on suhdeluku, joka on määritettävä mittauksin resistiivisyyden ja virrantiheyden perusteella.

Goodrich ja Fickett [34] työstimät vuonna 1982 kriittisen virran mittausstandardia, joka parantaisi mittaustulosten vertailukelpoisuutta. He testasivat eri johdingeometrioita sähkökenttäkriteereillä $1 \frac{\mu V}{cm}$, $0,1 \frac{\mu V}{cm}$ ja $0,01 \frac{\mu V}{cm}$. Eri geometrioilla on kaikilla omat etunsa ja haittansa. Vuonna 1984 niobititaanin kriittisen virran mittaustandardiin valittiin käämin muotoon kierretty lanka ja sähkökenttäkriteeriksi $0,2 \frac{\mu V}{cm}$. Muita testattuja lankatyyppejä ovat lyhyt suora, pitkä suora ja hiuspinni. [38]

Kääminmuotoisen langan hyötyjä ovat magneettikentän suunnan ja homogeenisuuden vaikutusten väheneminen. Jos on tarve testata yli 1 m pitkiä näytejohtimia, käämigeometria on paras vaihtoehto [30]. Lisäksi se toimii muita paremmin alhaisilla sähkökenttäkriteereillä, koska $V(I)$ -käyrän irtoaminen nolasta on parhaiten haavoittavissa. Se tarjoaa myös mahdollisuuden mitata ja verrata johtimen osavälien ominaisuuksia. Haittapuolena on, että johdinta joudutaan taivuttamaan. Taivutus laskee kriittistä virtaa, mutta arvioiden mukaan Nb_3Sn -johtimilla noin 7° käämin nousukulmalla muutos ei ole merkittävä ja $NbTi$ -johtimilla 3,2 cm:n säteisellä käämillä 8 T vuontiheydellä muutos on enintään 2 %. [38, 30]

Vuonna 1987 ajantasainen menetelmä n -arvon määrittämiseen oli laskea kulmakeroin $\log(V)$ vs $\log(I)$ -tasossa $V(I)$ -käyrän kriittistä virtaa edeltävästä osasta [21]. Nykyinen standardi suosittelee sen sijaan n -arvon määrittystä kriittisen virran jälkeisestä osasta [87].

1980-luvun lopulla suoritettiin Nb_3Sn -materiaalin VAMAS-vertailututkimus (*Versailles Agreement on Advanced Materials and Standards*), jossa olivat mukana Euroopan talousalue, Japani ja Yhdysvallat. Tässä projektissa vertailtiin uuden standardin mukaan mitattujen, eri laboratorioiden samanlaisilla näytteillä saamia tuloksia. Sähkökenttäkriteeriksi valittiin edelleen matalan lämpötilan suprajohteilla yleisin $0,1 \frac{\mu V}{cm}$. Tutkimustulosten perusteella standardia paranneltiin, minkä myötä seuraavien mittausten kohdalla laboratorioiden mittaustulosten väliset erot pieneivät [92]. [32]

3.2 Mittausjärjestelmän kuvaus

Perustieto, jonka mukaan käytännön suprajohteen kriittinen virta määritellään, on jännite V piirrettynä virran I funktiona, siis $V(I)$ -ominaiskäyrä. Muiden parametrien, kuten kentänvoimakkuuden, lämpötilan, mekaanisen jännitystilan ja sähkövuon tiheyden oletetaan säilyvän vakioina mittauksen aikana. Tuotetun käyrän tulisi olla

reversiibeli. Irreversiibeliys on merkki mittauksenaikaisista ongelmista, kuten näytteen lämpötilan noususta. [34]

Joskus $V(I)$ -mittauksessa esiintyy jännitettä myös alhaisilla virroilla. Syynä on liian lyhyt virtakontaktien etäisyys, jolloin virta ei ehdi jakaantua suprajohdefilamentteihin, vaan kulkee matriisimetallissa. Tämä jännite kasvaa virran nousun mukana jo paljon ennen kriittistä virtaa. Itse suprajohteen ominaisuudet jäävät siksi havaitsemattomiin. Tämä ilmiö on nimeltään *current-transfer voltage*. Suprajohteen ominaiskäyrässä on nähtävissä vuovirtajännite (*flux flow voltage*), joka syntyy vuoputkien liikkeestä suprajohteessa Lorentz-voiman ylittäessä pinning-voiman. Se aiheuttaa $V(I)$ -käyrän jyrkän jännitteen nousun kriittisen virran jälkeen. [34]

3.2.1 Mittalaitteisto

Kriittisen virran mittausta tai $V(I)$ -mittausta varten tarvittava instrumentointi sisältää ainakin seuraavat laitteet

- Magneetin teholähde
- Nanovolttimittari
- Magneetin quench-suojakytkentä
- Näytteen virtalähde

Näytteen virtalähteen tuottamassa virrassa saa olla enintään $\pm 2\%$ mittausepävarmuutta kriittisen virran kohdalla [87]. Virtalähteen liiallinen kohina aiheuttaa jännitesignaaliin voimakasta kohinaa $V(I)$ -käyrän jyrkässä osassa. Jännitesignaalin kohinan lisäksi satunnaiset virranvaihtelut voivat laskea näennäistä kriittistä dc-virtaa. [19, s. 151, 361–365]

$V(I)$ -käyrän nousun alkuvaihe sisältää paljon informaatiota, jota tarvitaan tekniiksessä suunnittelussa ja ongelmien tunnistamisessa. Tähän informaatioon päästään käsiksi kolmen keinon avulla. Ensiksi tarvitaan hyvät matalan lämpösähköisen jännitteen liitännät. Toiseksi johdinparit täytyy kiertää toistensa ympäri, jottei magneettikentän vaihtelu johtimen eri osissa indusoisi jännitettä niihin. Kolmanneksi tarvitaan herkkä jännitemittari, mielellään tarkkuudeltaan $0,01 \mu\text{V}$:a. [19, s. 151, 361–365]

Suprajohtavan magneetin teholähteeltä vaaditaan kahta ominaisuutta, joita tavallisilta virtalähteiltä ei vaadita. Niiden täytyy quench-tilanteessa kyetä dissipimaan

varastoitunut energia, niin että magneetti purkautuu kohtuullisessa ajassa. Lisäksi niiden on kyettävä rajoittamaan napoihinsa tuotettua jännitettä, jos magneetti quenchaa. [19, s. 151, 361–365]

Kun johtimen toinen pää on huoneenlämmössä ja toinen esimerkiksi 4,2 K:ssä, johtimen yli muodostuu jännite. Eri metallista valmistetut liitokset kasvattavat jännitettä. Tätä ilmiötä kutsutaan lämpösähköiseksi ilmiöksi. Lämpösähköisten jännitteiden minimoimiseksi jännitemittarin mittapäiden ja itse mittarin välissä tulee olla mahdollisimman vähän liitoksia. Johtojen tulee olla yhtenäisiä ja pakolliset liitokset, kuten mittapäiden ja näytteen välille, tulee tehdä ilman juotetta kupari-kupariliitoksina. [19, s. 364]

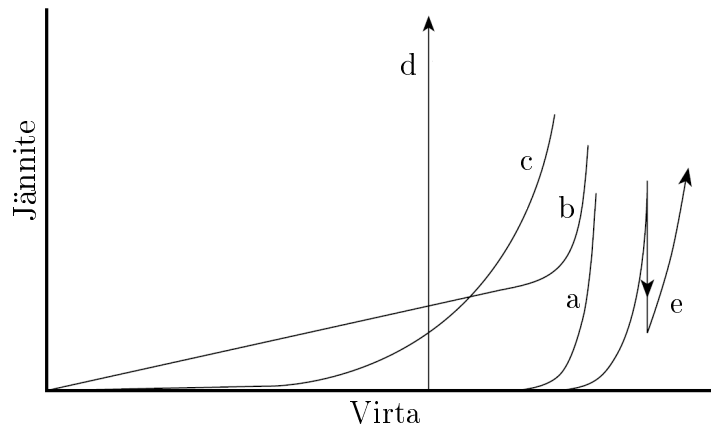
3.3 Mittauksen ongelmia ja ratkaisuita

Suprajohteiden ominaisuudet vaihtelevat jopa yhden valmistuserän sisällä. Siksi mittauksia täytyy suorittaa taaajaan laaduntarkkailun vuoksi. Niinpä mittausten menetelmän on oltava mahdollisimman yksinkertainen toteuttaa. Jännite- ja virtakontaktien asettamisessa on kaksi ydinkysymystä:

- Kuinka virran saa ylipäänsä johdettua näytteeseen ja sen suprajohdefilamentteihin mahdollisimman lyhyellä matkalla.
- Kuinka jännitekontaktit asetetaan niin, että mittaustulokset olisivat mielekkäitä.

Näistä ongelmista ensimmäinen on suurempi Nb₃Sn-johtimella kuin NbTi-johtimella, koska Nb₃Sn-johtimella *current-transfer*-ilmiö on paljon voimakkaampi ja se tarvitsee pidemmän kontaktipituuden, jotta virta jakautuu filamentteihin tasaisesti. Jälkimmäinen ongelma liittyy filamenttien twistaamiseen. Kun jännitekontaktien välisellä osiolla olevien kierteiden lukumäärä ei ole kokonaisluku, voidaan mittauksessa saada jopa negatiivisia jännitearvoja. Tilanne korjaantuu valitsemalla jännitekontaktien etäisyydeksi kierteistyspituuden monikerta. [34], [19, s. 293–295]

Tyypilliset ongelmatilanteista tuotetut käyrämuodot on esitetty kuvassa 3.1. Ekin mukaan [19, s. 370–372] on monia syitä, joiden vuoksi virta-jännite-data ei aina muistuta ihanteellista, potenssilain mukaista kuvan 3.1 käyrää (a). Joskus jännite pysyttelee nollassa, kunnes yhdellä virran arvolla se syöksyy suoraan mitta-asteikon yli, kuten käyrä (d). Tämä käyrä syntyy, jos näytelanka pääsee liikkumaan, jolloin liike generoi hetkessä tarpeeksi lämpöä suprajohtavan tilan menettämiseen. Samoin



Kuva 3.1 $V(I)$ -käyrämuotoja. Käyrä (a) kuvaa ideaalista $V(I)$ -käyttäytymistä, käyrät b–e taas esiintyvät erilaisissa ongelmatilanteissa. Mukautettu lähteestä [19, s. 371].

näytteen yhtäkkinen lämpeneminen muun ulkoisen häiriön tai liian heikon stabiloinnin vuoksi voi aiheuttaa tämän pystysuoran käyrämuodon.

Jos käytössä on liian epätarkka jännitemittari, voi samanlainen käyrämuoto esiintyä todellisen kriittisen virran kohdalla. Ongelmana on, että tällaisesta mittauskäyrästä on mahdotonta sanoa oliko kyseessä epästabiili näytelanka, jossa suprajohtava tila menetettiin ennenaikaisesti, vai todellinen transitio kriittisen virran ylityksen kohdalla. Tällöin on vaihdettava herkempään jännitemittariin, tai oikeaa kriittistä virtaa ei voida todentaa.

Eräs mahdollinen käyrämuoto kuvan 3.1 käyrän (b) mukainen on lineaarisesti nouseva käyrä, joka kriittisen virran kohdalla nousee lisää likipitään potenssilakia noudattaen. Tämä aiheutuu current-transfer-ilmiöstä. Virtakontaktien ja jännitemittauksen päiden välinen etäisyys on silloin liian lyhyt, joten virta ei ole vielä jakautunut tasaisesti filamenttien kesken. Virta kulkee sen sijaan osan matkasta resistiivisessä matriisimetallissa. [19, s. 201]

Siksakmuotoinen kuvan 3.1 käyrän (e) mukainen käyrämuoto aiheutuu kytkentäilmiöstä (*switching effect*), jolla on kaksi eri aiheuttajaa. Ensiksi, virta saattaa alhaisemmilla virran arvoilla kulkea ainoastaan osassa filamenteista. Virran noustessa jännite nousee, kunnes virta jakautuu aiemmin virrattomiin filamentteihin. Tällöin näytteen kriittistä virtaa ei kuvanna käyrän ensimmäinen nousu, vaan jälkimmäinen.

Toinen vaihtoehto kytkentäilmiölle on näytteenpitimen ja näytteen liian samansuuriset normaalitilan johtavuudet. Kun jännite suprajohteenäytteen yli kasvaa, voi virta jakaantua näytteen matriisimetallin ja näytteenpitimen välille. Tällöin näytteen todellista kriittistä virtaa kuvantaa $V(I)$ -käyrän ensimmäinen nousu. Loivan

paraabelimainen, kuvan 3.1 käyrän (c) mukainen käyttäytyminen on tyypillistä vahingoittuneelle, resistiiviselle tai epähomogeeniselle näytteelle. [19]

3.4 Standardien tiivistetty referointi

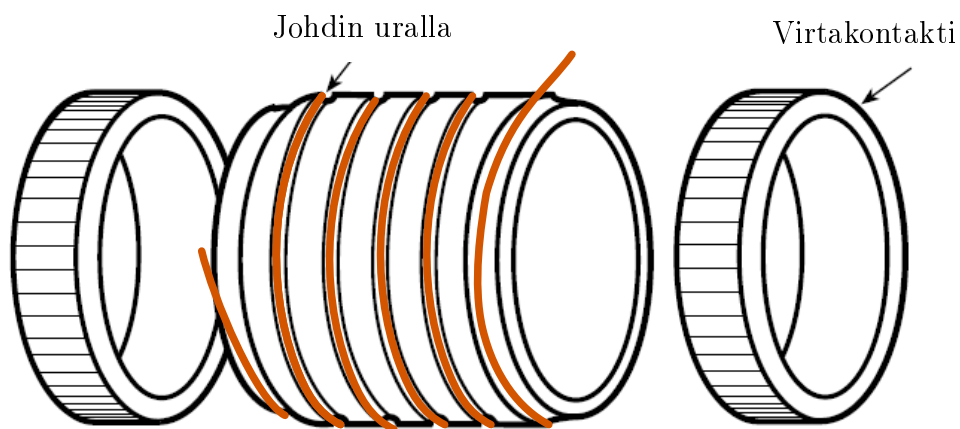
Tämä osio sisältää referointia SFS-EN 61788-1 -standardista, joka koskee NbTi-suprajohteen kriittisen virran mittausta.

3.4.1 Vaatimukset johtimelle

Johtimen kupari-NbTi-suhteen tulee olla suurempi kuin 1 ja filamenttien halkaisijan suurempi kuin $1\text{ }\mu\text{m}$. Johtimen kriittisen virran tulee olla alle 1000 A ja n -arvon tulee olla suurempi kuin 12. Poikkipinnan tulee olla pyöreä tai suorakulmainen ja poikkipinta-alan alle 2 mm^2 . Tämän standardin kuvaama menetelmä sopii myös muille johdingeometrioille ja johtimille, joiden kriittinen virta on yli 1000 A:a, mutta silloin on odotettavissa myös suurempi mittauserpätkä. Suurempi poikkipinta-ala vahvistaa omakenttäilmiötä, eli virrallisen näytteen itsensä synnyttämää magneettikenttää, mikä laskee kriittistä virtaa. [87]

3.4.2 Vaatimukset mittausasetelmalle

Johdin kierretään induktiivisesti mittauskaran (*measurement mandrel*) ympäri. Esimerkki näytteenpitimen eli mittauskaran rakenteesta on kuvassa 3.2.



Kuva 3.2 Näytteenpidin eli mittauskara, johon johdin kiinnitetään kriittisen virran mittausta varten. Muokattu lähteestä [19, s. 299].

Mittauskaran halkaisijan tulee olla suurempi kuin 24 mm ja siinä pitää olla kierteinen ura, jolle näyte asettuu. Uran syvyyden suositellaan olevan vähintään puolet pyöreän johtimen halkaisijasta tai poikkileikkaukseltaan suorakulmaisen johtimen paksuudesta. Uran nousukulman pitää olla alle 7° . Vaatimus minimihalkaisijasta johtuu siitä, että suprajohtimen taivuttaminen voi vaikuttaa sen sähkömagneettisiin ominaisuuksiin. Magneettikenttä saa olla enintään 0,7-kertainen näytemateriaalin kriittiseen magneettikenttään verrattuna. Tämä vastaa NbTi:lla 8 T:aa, kun toimintalämpötilana on 4,2 K.

Korkeampi magneettikenttä aiheuttaa standardin [87] perustelujen mukaan suuremman variaatiokertoimen, eli kriittisen virran hajonnan ja keskiarvon suhteen, sillä kriittinen virta on 9 T:sta alkaen herkempi magneettikentälle, taivutukselle ja lämpötilalle. Näyte kiinnitetään mittauskaraan riittävällä kireydellä tai matalan lämpötilan sideaineella. Näytejohdin juotetaan molemmista päistään kiinni virtakontakteihin. Juotetta ei saa käyttää virtakontaktien välisellä osuudella. Mittauskaran tulee olla joko eristemateriaalia tai johtavaa ei-ferromagneettista materiaalia. [87]

3.4.3 Mittauksen läpivienti

Kriittinen virta määritetään jännite-virta-käyrästä näytteelle staattisella magneettikentän voimakkuudella tunnetussa lämpötilassa nestemäisessä jäähdytysainekylvyssä vakioaineessa. Mittausmenetelmälle on kaksi vaihtoehtoa: *constant sweep method* ja *ramp-and-hold method*. Näistä ensimmäisessä virtaa kasvatetaan tasaisesti kriittisen virran yli ja jälkimmäisessä nostetaan virtaa useampaan valittuun $V(I)$ -käyrän pisteeseen, joissa kussakin virta pidetään vakiona, tallettaen samalla mittausdataa. Tämän diplomityön esimerkeissä on käytetty *constant sweep methodia*. [87]

$V(I)$ -käyrän saamiseksi suprajohdenäyte altistetaan tasavirralla ja jännite näytteen osan yli mitataan. Virtaa kasvatetaan nolasta alkaen ja jännite-virta-ominaiskäyrä kirjataan. *Constant sweep* -menetelmää käytettäessä virran kasvattamiseen nolasta kriittiseen virtaan on käytettävä yli 10 s aikaa. Esimerkiksi johtimella, jonka kriittinen virta on 800 A täytyy virran nousunopeuden olla siis alle $80 \frac{\text{A}}{\text{s}}$. *Ramp-and-hold* -menetelmällä virran kasvattamisen täytyy olla hitaampaa kuin se olisi kasvatettaessa virtaa nolasta kriittiseen virtaan 3 s aikana. Siten esimerkiksi johtimelle, jonka kriittinen virta on 600 A pitää virran nousunopeuden olla alle $200 \frac{\text{A}}{\text{s}}$. Kriittinen virta määritellään virraksi, jolla määriteltä sähkökenttäkriteeri tai resistiivisyyskriteeri saavutetaan. Jännitekriteeri lasketaan mittauspäiden välin avulla. [87]

3.4.4 n -arvon määrittäminen

Standardin mukaan n -arvo määritetään $\log(U)$ vs $\log(I)$ -kuvaajan kulmakertoimeksi siltä alueelta, jolta I_c on määritetty, tai käyttäen kahden eri kriteerillä määritetyn I_c :n arvoa. Alue, jolta I_c on määritetty on tulkinnanvarainen ohje, eikä sitä selitetä standardissa tarkemmin. Kahden eri kriteerin välisen alueen määrittely sen sijaan löytyy standardista.

Sillä tarkoitetaan kahden eri sähkökenttäkriteerin perusteella määritellyn kriittisen virran välistä aluetta, tai kahden eri resistiivisyyskriteerin perusteella määritetyn kriittisten virran välistä aluetta. Nämä välit ovat sähkökenttäkriteeriväli $10\text{--}100 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$ ja resistiivisyyskriteeriväli $1 \times 10^{-14}\text{--}1 \times 10^{-13} \Omega \text{ m}$. Jos on vaikeaa mitata kriittinen virta sähkökenttäkriteerillä $100 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$, korvataan se pienemmällä sähkökenttäkriteerillä, tai suoritetaan mittaukset käyttäen resistiivisyyskriteeriä.

n -arvon määrittäminen tapahtuu siis ratkaisemalla $\log(U)$ vs $\log(I)$ -kuvaajan kulmakertoimen. Ongelmana on, ettei kuvaaja ole aina lineaarinen edes kriittisen virran sähkökenttäkriteeri $10 \frac{\mu\text{V}}{\text{m}}$:n kohdalla. Siispä valittu n -arvon määrittelyväli täytyy ilmoittaa.

3.5 Eri kriteerit ja niiden käyttö

Tarkka piste, jossa virrallisen suprajohteen yli alkaa syntyä jännitettä, ei ole mitattavissa. Ei myöskään ole olemassa vain yhtä oikeaa tapaa määrittää suprajohteen kriittinen virta. Seuraavat kappaleet esittelevät kolme kriteeriä, jotka tähän soveltuvat. [19, s. 396]

3.5.1 Sähkökenttäkriteeri

Sähkökenttäkriteeri on suosituin kriteeri, se on yksinkertainen ja riippumaton näytteen halkaisijasta. Kriittinen virta on se piste, missä $V(I)$ -käyrän virta leikkaa valitun kriittisen jännitetasen. Matalan lämpötilan suprajohteille $0,1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$ ja korkean lämpötilan suprajohteille $1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$ ovat tyypilliset sähkökenttäkriteerit. Esimerkiksi 11 cm:n jännitekontaktien etäisyydelle kriittinen jännitetaso olisi näistä ensiksi mainitulla sähkökenttäkriteerillä $1,1 \mu\text{V}$.

Sähkökenttäkriteeri sopii huonosti tilanteisiin, joissa $V(I)$ -käyrä lähenee lineaarista muotoa. Silloin sähkökenttäkriteeri ei huomioi virran jakautumista matriisimetallin ja näytteen kesken, vaan antaa kriittiselle virralle liian suuren arvon. Tällaisia tilanteita ilmenee esimerkiksi lähellä kriittistä magneettivuontiheyttä. [19, s. 402]

3.5.2 Resistiivisyyskriteeri

Kriittinen virta leikkaa $V(I)$ -käyrän valitun resistiivisyyskriteerin kohdalla. Kriteeri määräytyy sovellutuksen teknisten vaatimusten mukaan. Resistiivisyyskriteerin käyttö on perusteltua esimerkiksi magneettisuunnittelussa. Resistanssi on virran ja jännitteen osamäärä ja näyttekappaleen pituuden ja poikkipinta-alan ollessa tunnettuja, on sen resistiivisyys

$$\rho_c = R_c \frac{A}{L}. \quad (3.2)$$

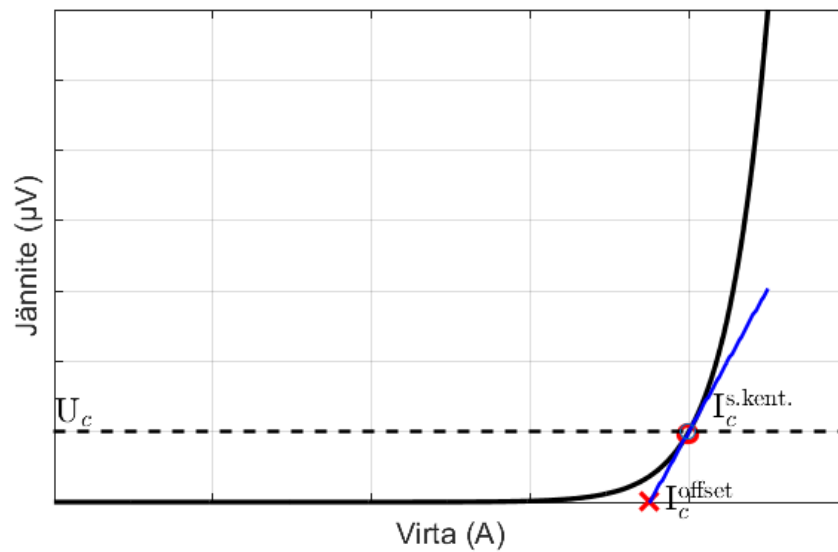
Käytännöllisiä resistiivisyyskriteereitä ovat 10^{-13} – $10^{-11} \Omega \text{ cm}$. Resistiivisyyskriteeri soveltuu persistoitavien magneettien arvioimiseen, sillä niissä virran vaimeneminen halutaan välttää. Resistiivisyyskriteeri on käyttökelpoinen samalle näytteelle vain kapealla virtavaihteluvälillä. Keskisuurelle magneettivuon tiheydelle sopiva kriteeri on liian matala alhaisemmalle virralle suurella magneettivuon tiheydellä. Lisäksi se on liian korkea suurelle virralle matalalla magneettivuon tiheydellä. [19, s. 399–400]

3.5.3 Offset-kriteeri

Offset-kriteeri välttää kummankin aiemman kriteerin huonot puolet. Se sopii laajalle virtavälille eikä johda hankaluuksiin n -arvon laskiessa ja suprajohteen ominaisuuksien muuttuessa ohmisiksi, esimerkiksi lähellä kriittistä lämpötilaa tai magneettikenttää. Offset-kriteerin mukaista kriittisen virran määrittystä havainnollistaa kuva 3.3.

Offset-kriteerin lähtökohta on sähkökenttäkriteeri. Kriittinen virta ei kuitenkaan ole $V(I)$ -käyrän leikkauspisteessä kriittisen sähkökentän kohdalla vaan tähän pisteeseen piirretyn tangentin ja virta-akselin leikkauspisteessä. Jos $V(I)$ -käyrä on ohminen, sille piirretty tangentti leikkaa virta-akselin nollan kohdalla, siis kriittinen virta on tällöin nolla. Tangentin ja $V(I)$ -käyrän yhteisen pisteen osoittavaksi sähkökentän voimakkuudeksi sopii sähkökenttäkriteerille tyypillinen arvo, matalan lämpötilan suprajohteilla $0,1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$. [19, s. 400–402]

Yhteenvedona kriteereistä voisi sanoa, että mitä korkeampi näytteen n -arvo on, sitä lähempänä eri kriteereiden perusteella määritetyt kriittisen virran arvot ovat toisiaan [34]. Tämän diplomityön esimerkeissä kriittinen virta määritetty sähkökenttäkriteerin perusteella. Sähkökenttäkriteeri on myös V-I-analysointityökalun käyttämä kriteeri.



Kuva 3.3 Offset-kriteerin mukainen kriittinen virta on havainnollistettu kuvaan punaisella rastilla. Sähkökenttäkriteerin perusteella määritettyä jännitekriteeriä on havainnollistettu katkoviivalla. Sähkökenttäkriteerin kohdalla $V(I)$ -käyrää sivuavan tangentin ja jänniteakselin leikkauspiste määrittävät offset-kriteerin mukaisen kriittisen virran. Mukautettu lähteestä [19, s. 397].

3.6 Analysoinnin haasteet

Analysoinnin haasteita tuovat tilastolliset virheet ja systemaattiset virheet [59]. Mittausvirheitä ovat kaikki tekijät, jotka aiheuttavat epätarkkuutta, joita ovat

- kohina jännitesignaalissa
- kohina virtasignaalissa
- epätarkkuus magneettivuon tiheyden mittauksessa
- epätarkkuus lämpötilamittauksessa
- näytteen lämpötilan muutos esimerkiksi liikkeen vuoksi
- virhe potenssilain sovituksessa

Näistä tilastollisia virheitä ovat jännite- ja virtakohina ja loput ovat systemaattisia virheitä. Tilastolliset virheet johtavat epätarkkuuteen kriittisen virran ja n -arvon määrittämiseen. Systemaattiset virheet aiheuttavat suoraan virheitä mittaustuloksiin. Tämä diplomityö keskittyy jännite- ja virtakohinaan, sekä lyhyesti potenssi-

lain sovitukseen. Virheiden vaikutuksia tuloksiin käsitellään tarkemmin kirjallisuudessa [3, 38, 57, 59]. Eräs $V(I)$ -mittauksessa yleinen vakionmuotoinen systemaattinen virhe on offset-jännite. Offset-jännitteen suodattaminen pois mittausdatasta on vaivatonta, sillä se voidaan yksinkertaisesti vähentää pois. Tässä diplomityössä käytetty V-I-analysointityökalu määrittelee nollatason mittausdatan alun perusteella, jossa jännitteen tiedetään olevan nollassa. [59]

4. TILASTOLLINEN ANALYYSI

Tämä luku tarkastelee kohinoiden vaikutusta mittausdatan virherajoihin. Luvun pääsisältöä ovat virta- ja jännitekohinan vaikutusten analysointi. Kriittisen virran ja n -arvon luottamusvälejä tarkastellaan kohinavarianssin fuktiona.

4.1 Varianssin määrittäminen

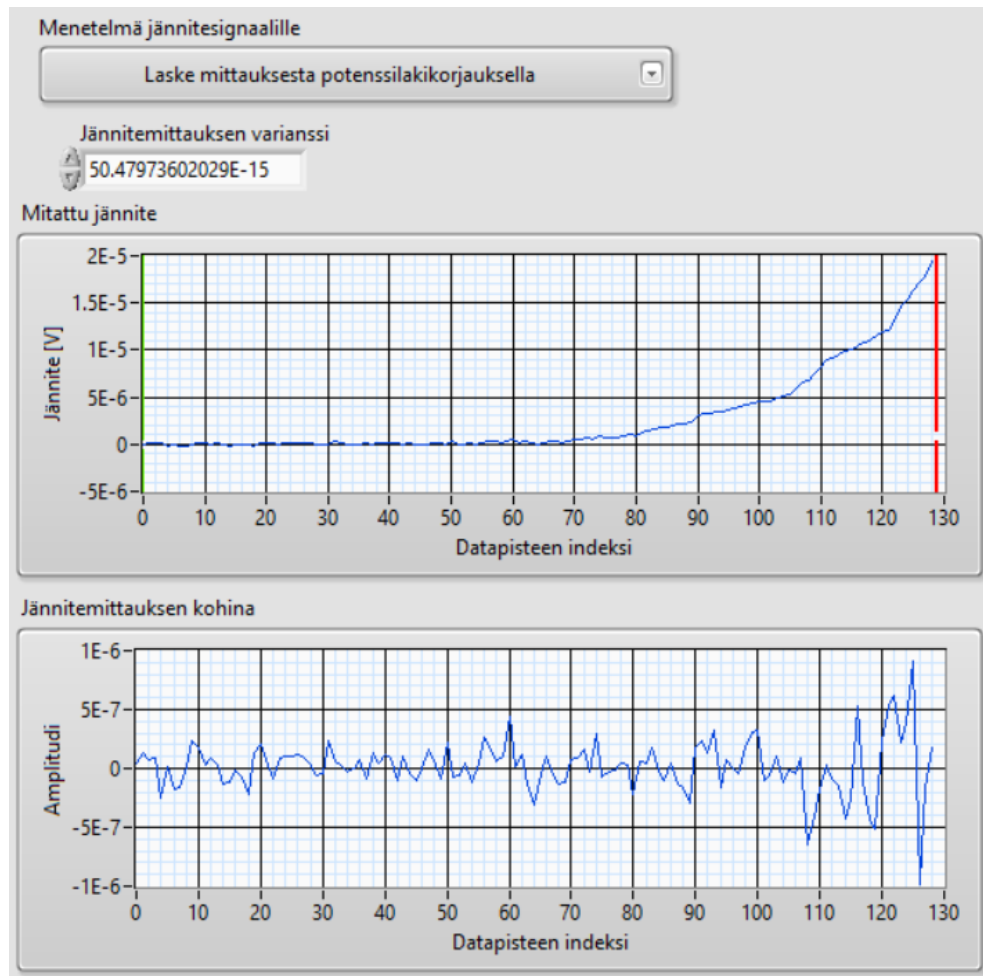
Varianssi σ^2 määritellään yhtälöllä

$$\sigma^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M |A_i - \mu|^2, \quad (4.1)$$

jossa σ on keskihajonta, M on havaintojen eli mittauspisteiden lukumäärä, A on satunnaismuuttujavektori eli virta- tai jännitesignaali ja μ on vastaavan signaalin odotusarvo.

4.1.1 Jännitevarianssin määrittäminen

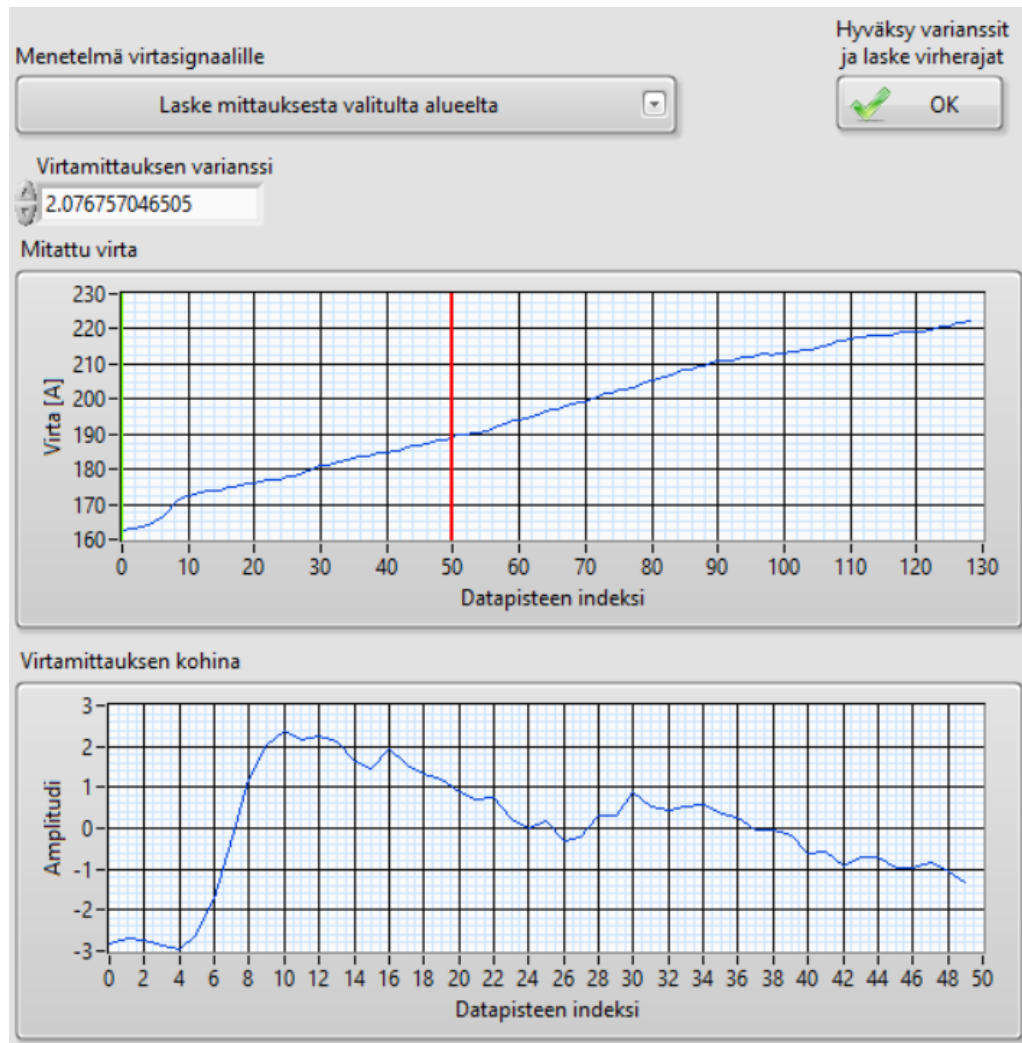
Oletusmenetelmä jännitevarianssin määrittämiseen mittausdatasta on laskea se mittausdatan alusta, esimerkiksi ensimmäisen 50 datapisteen perusteella, kun jännitteen tiedetään olevan nollassa. Vaihtoehtoinen menetelmä on määrittää jännitevarianssi hyödyntäen kaikkia mittauspisteitä niin että, mittausdatasta vähennetään potenssilakisovite ja oletetaan jäljelle jääneen datan kuvantavan mittauskohinaa. Simuloitujen $V(I)$ -käyrien kohdalla potenssilakikorjauksen antama varianssi ei eroa mittauksen alusta määritetystä varianssista, sillä varianssi on vakio. Todellisella datalla taas mittausdata ei aina seuraa tarpeeksi hyvin potenssilakisovitetta, joten tuloksena on epärealistisen suuri varianssi, testatulla aineistolla 2–6-kertainen mittauksen alusta eli nollajännitteellä määritettyyn varianssiin verrattuna. Kun käyrä seuraa potenssilakia hyvin, kuten kuvassa 4.1, saadaan silloinkin 2-kertainen varianssi potenssilakikorjauksella. Sen sijaan ei voida tietää, johtuuko kaikki epäideaalisesta mittausdatasta vai esimerkiksi virtariippuvasta jännitekohinasta.



Kuva 4.1 Jännitevarianssin määrittäminen potenssilakikorjauksella. Näytteen $V(I)$ -käyrä noudattaa likipitään potenssilakia, joten jännite värähtelee tasaisesti nollan molemmiin puolin. Huomaa kohinan kasvu viimeisen 25 datapisteen alueella.

4.1.2 Virtavarianssin määrittäminen

Virtavarianssille oletusmenetelmä on hyödyntää kohinaprofiilitaulukkoa. Se kuvantaa virtavarianssia virran funktiona ja on määritetty samasta virtalähteestä, jota käytetään $V(I)$ -mittauksessa. Jos kohinaprofiilitaulukkoa ei ole saatavilla, voidaan virtavarianssi määrittää myös mittausdatasta. Virta käyttäytyy ideaalitapauksessa lineaarisesti, joten virtakohina jää jäljelle, kun vähennetään virtasignaalista lineaarinen sovite. Tämä on toimiva keino, kunhan virtamittausdatasta valitaan osaväli, jolla virta todella kasvaa lineaarisesti. Virtakohinan määrittäminen mittausdatasta V - I -analysointityökalulla on esitetty kuvassa 4.2. Todellisen mittausdatan perusteella sellaisia välejä on mittausdatasta paljon, mutta ne ovat joskus lyhyitä, vain noin 10 datapisteen mittaisia. Lisäksi on vaikea saada hyvää arviota virtavarianssista kriittisen virran kohdalta, jos määrittäminen tehdään mittauksen alkupäästä huomattavasti pienemmällä virralla.



Kuva 4.2 Virtavarianssin määrittäminen mittauksesta. Näytteen virran tulee nousta lineaarisesti kursorien välillä, jotta tuloksena saatu varianssi kuvaa realistisesti mittauskohinaa. Alempi kuvaaja on tarkennettu kursorien väliselle alueelle ja siitä on vähennetty 1. asteen sovite.

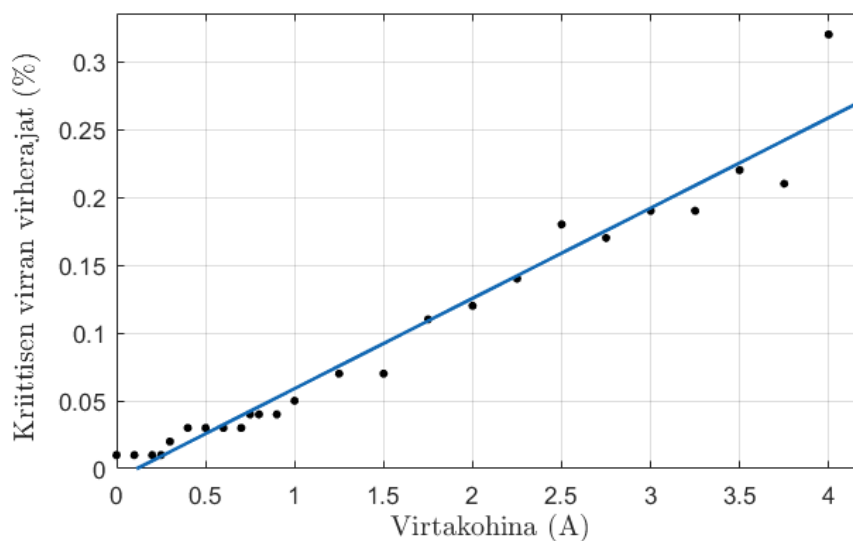
4.2 Eri varianssien vaikutus potenssilakisovitteen virherajoihin

Varianssien vaikutusta potenssilakisovitteen virherajoihin testattiin luomalla $V(I)$ -käyriä Matlab-ohjelmistoa käyttäen. Käyriin lisättiin virta- ja jännitekohinaa toisistaan riippumatta ja käyräsarjojen ominaisuuksia tutkittiin V-I-analysointityökalulla. Virherajojen muutosta kohinan funktiona tarkasteltiin regressiokäyrien avulla.

4.2.1 Kohina virrassa

Virtakohinan lähteenä toimii yleensä virtalähde. Se tuottaa myös kohinaa virtasignaaliin [31]. Reaalimaailman virtalähteet voivat tuottaa virrasta epälineaaris-

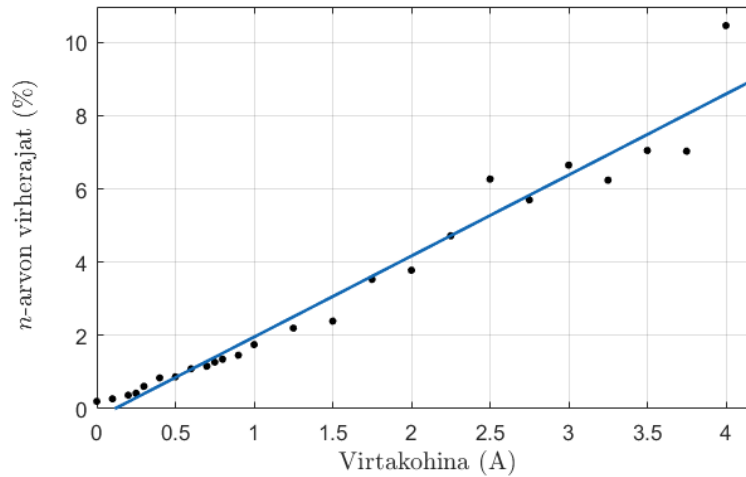
ti riippuvaista kohinaa. Myös itse virtalähde voi tuottaa epälineaarisen virran [8]. Matlab-ohjelmistolla luotiin $V(I)$ -käyriä eri virtavariansseilla, pitäen kriittinen virta, jännitevarianssi ja n -arvo vakioina. Virtakohinana käytettiin gaussikohinaa, jonka keskiarvo on nolla. Simuloinnissa käytössä oli virran varianssi väliltä 0–4 A. V-I-analysointityökalua käytettiin jokaisen tuotetun $V(I)$ -käyrän kriittisen virran ja n -arvon virherajojen määrittelyyn. Kuva 4.3 esittää yhteenvedon eri virtavarianssien vaikutuksesta kriittisen virran virherajoihin.



Kuva 4.3 Virtakohinan vaikutus kriittiseen virtaan. Y-akseli kuvaa sitä, kuinka paljon suure voi poiketa määritetystä I_c :n arvosta 95 % luottamusvälin sisällä. Pisteet ovat simulaation tuloksena piirrettyjen $V(I)$ -käyrien arvoja. Sinisellä piirretty viiva on lineaarinen sovite simulaatiotuloksille.

Jokainen piste kuvantaa siis yhdelle $V(I)$ -käyrälle tehtyä virherajojen määrittystä V-I-analysointityökalulla. Kuva 4.4 esittää virtakohinan vaikutusta n -arvon 95 %:n luottamusvälin suuruuteen.

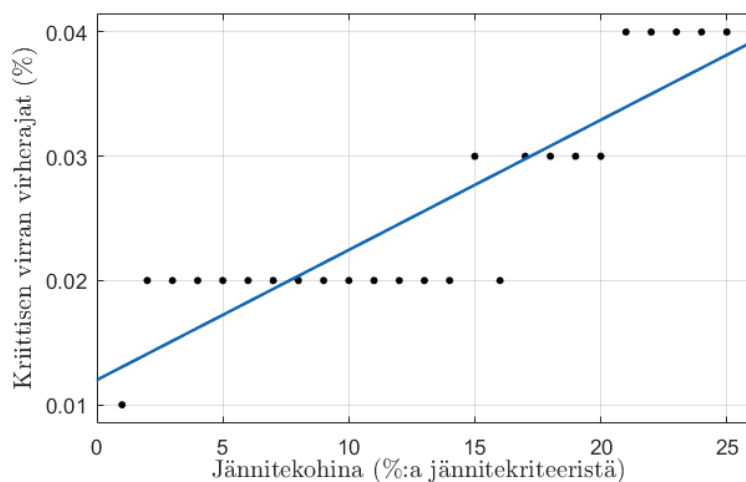
Tämä 95 %:n luottamusvälin arvo on se vaihteluväli, jonka sisällä todellinen arvo sijaitsee edellä mainitulla todennäköisyydellä. Kuvien 4.3 ja 4.4 simulaatioissa käytettiin jännitekohinan arvoa 4 % jännitekriteeristä, n -arvoa 70 ja kriittistä virtaa 800 A. Tämä simuloi NbTi-johdinta noin 4 T:n magneettivuon tiheyden ulkoisessa kentässä. Kohina virrassa korreloi kriittisen virran ja n -arvon virherajojen kanssa. Karkeasti arvioituna virtakohinan kaksinkertaistuminen johti simulaatioesimerkeissä sekä kriittisen virran virherajojen, että n -arvon virherajojen kaksinkertaistumiseen. Vaikutus n -arvon virherajoihin oli noin 30-kertainen verrattuna kriittisen virran virherajoihin.



Kuva 4.4 Virtakohinan vaikutus n -arvoon. Y-akseli kuvaa sitä, kuinka paljon suure voi poiketa määritetystä n -arvosta 95 % luottamusvälin sisällä. Pisteet ovat simulaation tuloksena piirrettyjen $V(I)$ -käyrien arvoja. Sinisellä piirretty viiva on lineaarinen sovite simulaatiotuloksille.

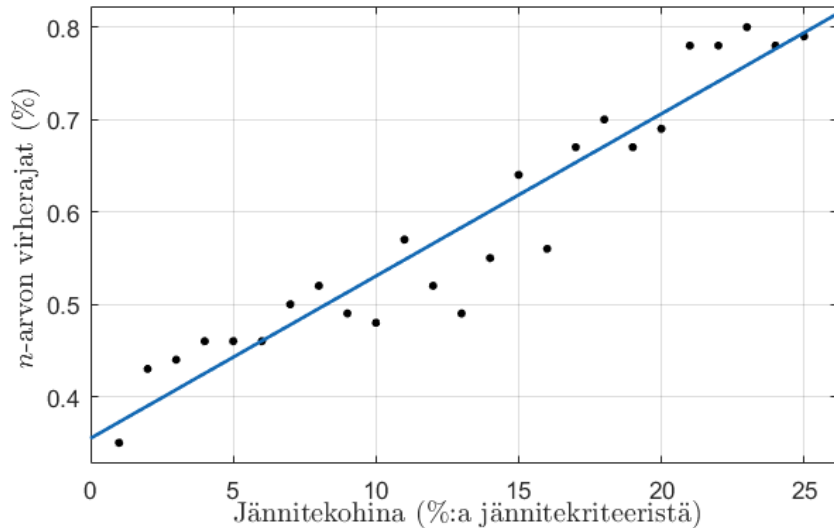
4.2.2 Kohina jännitteessä

Jännitekohinan vaikutuksen selvittämiseksi luotiin Matlab-ohjelmistolla $V(I)$ -käyriä eri jännitevariensseilla niin, että kriittinen virta, n -arvo ja virtavarianssi olivat vakioita. Jokaiselle käyrälle jännitevarienssiltaan 0–25 % jännitekriteeristä määritettiin virherajat kriittiselle virralle ja n -arvolle 1 % välein. Kuvien 4.5 ja 4.6 simulaatioissa kriittisen virran arvo oli 650 A, n -arvo 60 ja virtakohina 0,25 A.



Kuva 4.5 Jännitekohinan vaikutus kriittisen virran virherajoihin. Y-akseli kuvaa sitä, kuinka paljon suure voi poiketa määritetystä I_c -arvosta 95 % luottamusvälin sisällä. Sinisellä piirretty viiva on lineaarinen sovite simulaatiotuloksille.

Valittu kriittinen virta ja n -arvo vastaavat NbTi-johtimen mahdollisia arvoja noin 5 T:n ulkoisessa magneettikentässä. Kuvan 4.5 pisteet ovat simulaation tuloksena piirrettyjen 25:n $V(I)$ -käyrän kriittisen virran luottamusvälin suuruuden arvot eri jännitekohinan arvoilla. Kuva 4.6 esittää samojen $V(I)$ -käyrien n -arvon luottamusvälin suuruudet jännitekohinan funktiona. Jännitekohinan vaikutus kriittiseen virtaan ja n -arvoon on simulaatioiden perusteella virtakohinaa vähäisempi. Työtä varten tehdyt simulaatiot viittaavat siihen, että jännitekohina voi kasvattaa kriittisen virran ja n -arvon virherajoja, mutta ei kovin merkittävästi. Vaikutus kriittisen virran virherajoihin on odotettavissa olevilla jännitekohinan arvoilla (alle 10 %) noin kertaluokan pienempi kuin virtakohinalla. Jännitekohinan vaikutus n -arvon virherajoihin oli noin 20-kertainen kriittisen virran virherajoihin verrattuna. Suurempi kuin 0,5 A:n virtavarianssi johti siihen, että jännitevarianssin vaikutus virherajoihin peittyi virtakohinan alle.



Kuva 4.6 Jännitekohinan vaikutus n -arvon virherajoihin. Y-akseli kuvaa sitä, kuinka paljon suure voi poiketa määritetystä n -arvosta 95 % luottamusvälin sisällä. Pisteet kuvaavat yksittäisten simuloitujen $V(I)$ -käyrien virherajoja eri kohinan arvoilla. Sinisellä piirretty viiva on lineaarinen sovite simulaatiotuloksille.

Barzi arvioi [3], että johtimella, jonka n -arvo on 30, sinimuotoisen jännitekohinan amplitudin on oltava 47 % jännitekriteeristä, jotta se aiheuttaisi kriittisen virran virherajoihin 1 % kasvun. Tämä olisi paljon suurempi kohina kuin yhdessäkään tarkastellussa mittaussarjassa. Goodrichin ja Splettin mukaan [35] *sinimuotoinen* virran aaltoilu sähköverkon taajuudella ja sen monikertojen taajuuksilla laskee kriittistä virtaa ja n -arvoa. Tätä ilmiötä ei ollut testatun simulaatioaineiston perusteella havaittavissa gauss-kohinalla.

5. PAINOTUKSEN VAIKUTUS

Standardin mukaan n -arvo määritetään $\log(I)$ vs $\log(V)$ -kuvaajan kulmakertoimena [87]. V-I-analysointityökalulla jännite-virta-sovitekäyrä piirretään pienimmän neliosumman menetelmällä mittausdatalle. Työkalu piirtää sovitekäyrän ja mittausdatan myös $\log(I)$ vs $\log(V)$ -tasossa. Mittausdataa kannattaa kuitenkin painottaa tai valikoida V-I-analysointityökaluun sisällytettyjen toimintojen avulla, jotta tulokset ovat jatkuvia eli johdonmukaisia aiempien tulosten kanssa, vertailukelpoisia ja ettei käyrän sovituksessa tehdä virheitä. Standardi [87] suosittelee käyttämään mittausdataa sähkökenttäkriteeriväliltä $0,1-1 \frac{\mu V}{cm}$, joten tämä on mittausdatan valinnan lähtökohta myös V-I-analysointityökalulla.

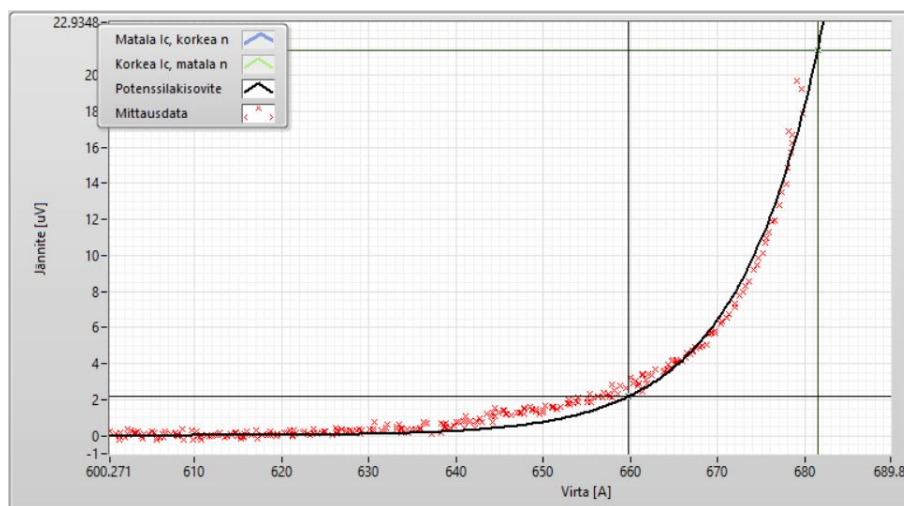
5.1 Painotustavat

Kahta painotusmenetelmää, ns. laatikkopainotusta ja noidanhattua sovellettiin mittausdataan. Laatikkopainotuksessa valitun alueen kaikkia pisteitä painotetaan valitulla painokertoimella. Tämä tarkoittaa, että sovitekäyrän piirtämisessä painotetun välin pisteet ovat painokertoimen osoittaman luvun verran merkitsevämpiä. Esimerkiksi jos pisteelle A painokerroin on 5, toimii painotus samoin kuin että pisteessä A olisi viisi mittapistettä. Noidanhattupainotuksessa painotetaan valitulla painokertoimella painotusvälin keskikohtaa lähimpänä olevia pisteitä ja painotus pienenee painotusvälin molempia reunoja kohti, ollen reunoilla ja välin ulkopuolella 1. Painotuksen voi siis visualisoida tasakylkisenä kolmiona eli ns. noidanhattuna.

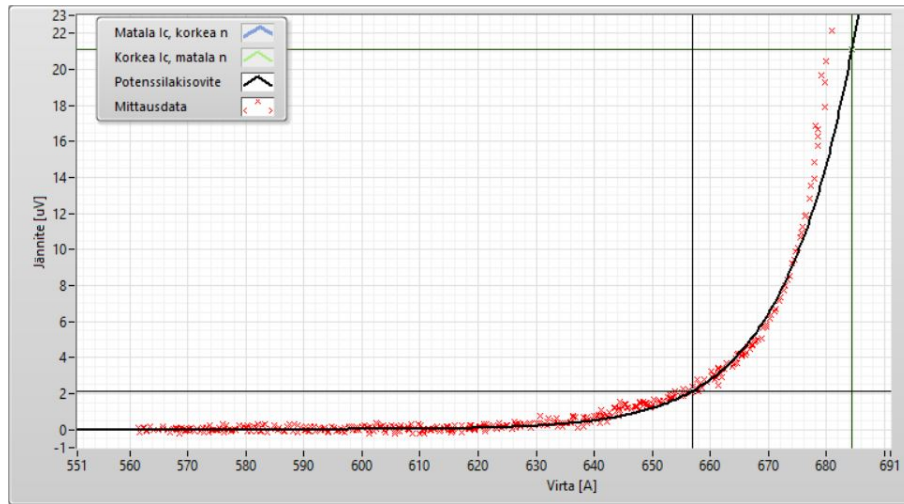
V-I-analysointityökalulla voidaan käyttää kumpaa tahansa painotustapaa ja painokerroin ja painotusväli ovat vapaasti valittavissa. Tulosten johdonmukaisuuden varmistamiseksi näiden valinta on syytä vakioda. Standardin suositellut vaihtoehdot ovat määrittää n -arvo kriittisen virran ympäristöstä valitulta väliltä tai kriittisestä virrasta alkavalta, 10-kertaiseen sähkökenttäkriteeriin päättyvältä väliltä [87]. Tämä jälkimmäinen kriteeri on selkeämpi, koska kriittisen virran ympäristön voi tulkita monella eri tavalla. Erilaiset tulkinnat eri johdinvalmistajien ja -testaajien välillä voisivat johtaa erimielisyyteen johdinten suorituskyvystä. Tällöin potenssilain sovitamiseen jäävät vapaudet antavat mahdollisuuden tulkita kriittisen virran ympäristö

omalle johtimelle suotuisalla tavalla, eli esimerkiksi ilmoittaa suurimmat arvot, jotka jollakin tavalla ovat vielä perusteltavissa. Pahimmassa tapauksessa eri tahojen ilmoittamat arvot eivät ole vertailukepoisia, ellei sovita yhdessä käytettävää määrittelyväliä. Huonona puolena on, että kaikki näytteet eivät ole stabiileja 10-kertaiseen sähkökenttäkriteeriin asti tai $V(I)$ -käyrä ei ole enää palautuva. $V(I)$ -mittauksessa ei siis aina voida turvallisesti nostaa virtaa niin korkealle, koska silloin riskeerattaisiin näytteen vahingoittuminen. Painotus tai datapistevälin valinnalla ei olisi merkitystä, jos $V(I)$ -käyrä olisi täysin ideaalinen ja potenssilain mukainen. Usein näin ei kuitenkaan ole, vaan yhtälö 2.5 on vain approksimaatio.

Kuvien 5.1 ja 5.2 lähtödata on sama. Painotusvälin valinta saa kuitenkin aikaan suuren eron potenssilain sovituksessa. Kuvan 5.1 käyrän sovituksessa on painotettu kahden jännitekriteerin välistä aluetta, kuvassa 5.2 taas väliä ± 20 A kriittisestä virrasta. Kriittisen virran ero on 3 A, siis alle 0,5 %:a I_c :stä. Sen sijaan n -arvojen välinen ero on 16, joten ero on 22 %. Ero johtuu kriittistä virtaa ennen esiintyvistä ennenaikaisesta jännitteen noususta. Tämä käyttäytyminen on huomioitava valmiin tuotteen (magneetti, virtajohdot) suunnittelussa, koska käyrän varhainen irtoaminen nolasta voi aiheuttaa lämmön generoitumista odotettua pienemmällä virralla. Mittauksen analysoinnilla voidaankin todeta kyseessä olevan melko huonosti potenssilakia noudattava näyte. Kuvan 5.1 mukainen sovitus ja n -arvo eivät anna koko kuvaa näytteen ominaisuuksista, vaikka sovituskäyrä onkin sovitettu välille $0,1-1 \frac{\mu V}{cm}$.



Kuva 5.1 Esimerkki dataan sovitetusta käyrästä. Sovitus tehty painottaen väliä $0,1-1 \frac{\mu V}{cm}$ kertoimella 30. $I_c = 660$ A, $n = 72$.



Kuva 5.2 Esimerkki dataan sovitetusta käyrästä. Sovitus tehty painottaen kertoimella 30 väliä $I = 640 \text{ A}$ ja jännitekriteerien puoliväliä, jossa $U = 11,5 \mu\text{V}$, (siis väliä $I_c \pm 20 \text{ A}$). $I_c = 657 \text{ A}$, $n = 56$.

5.2 Painotusesimerkkejä

Tämä osio sisältää laatikkopainotuksen ja noidanhattupainotuksen avulla piirrettyjen käyräsovitteiden vertailua. Eri painotustapojen avulla määritettyjä kriittisiä virtoja ja n -arvoja sekä niiden luottamusvälejä vertaillaan. Sekä todellista että simuloitua mittausdataa analysoidaan.

5.2.1 Todellisen mittausdatan esimerkkejä

Tässä osiossa esitellään kahdella johtimella tehtyjen mittausten tuloksia. Mittausdatana toimivat 2 mittaussarjaa, jotka kumpikin sisältävät 5 $V(I)$ -mittausta, joiden perusteella voidaan määrittää kriittinen virta ja n -arvo. Mittaukset tehtiin molemmille johtimille 1 T:n välein magneettivuon tiheyksillä 4–8 T. Tuloksia analysoitiin V-I-analysointityökalulla siten, että jokaiselle kummankin mittaussarjan mittaukselle sovitettiin potenssilakisovite sekä laatikkopainotuksella että noidanhattupainotuksella painokertoimen 30 ollessa välillä $0,1\text{--}1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$. Virtakohina määritettiin virtalähteen kohinaprofilin avulla ja jännitekohina mittauksen alun kohinan perusteella.

Molempien painotustapojen tuottamat tulokset, eli I_c , n , 95 %:n luottamusvälit I_c :lle ja n :lle, kirjattiin näytteelle 1 taulukoihin 5.1 ja 5.2. Luottamusvälin rajat kirjattiin sekä absoluuttisesti ampeereina ja yksiköttömän n -arvon lukuarvona, että prosentteina I_c :stä ja n :stä. Vastaavat tulokset näytteelle 2 kirjattiin taulukoihin 5.3 ja 5.4.

Näytteellä 1 suurin painotustavan valinnan vaikutus oli n -arvon suuruus. Tuloksissa 5 T:n vuontiheydellä laatikkopainotuksella määritetty n -arvo (87,91) on noin 2 yksikköä suurempi kuin noidanhattupainotuksella määritetty n -arvo (85,43). Laatikkopainotuksella kyseisessä 5 T:n mittauksessa n -arvon virherajat olivat suurimmat. Painotustapa ei merkittävästi vaikuttanut kriittisen virran arvoon.

Taulukko 5.1 Yhteenveto $V(I)$ -mittauksista näytteelle 1 ja käyrän sovitukselta noidanhattupainotuksella.

Magneettivuon tiheys (T)	I_c (A)	$I_c:n$ virherajat (A)	$I_c:n$ virherajat (%)	n -arvo	n -arvon virherajat	n -arvon virherajat (%)
4	691.72	0.3	0.04	90.32	2.69	2.98
5	568.77	0.28	0.05	85.43	2.34	2.74
6	448.59	0.18	0.04	71.6	1.25	1.75
7	327.28	0.15	0.05	51.61	0.77	1.49
8	208.93	0.12	0.06	35.61	0.44	1.22

Taulukko 5.2 Yhteenveto $V(I)$ -mittauksista näytteelle 1 ja käyrän sovitukselta laatikkopainotuksella.

Magneettivuon tiheys (T)	I_c (A)	$I_c:n$ virherajat (A)	$I_c:n$ virherajat (%)	n -arvo	n -arvon virherajat	n -arvon virherajat (%)
4	691.78	0.3	0.04	91.02	2.64	2.9
5	569.04	0.37	0.07	87.91	3.23	3.68
6	448.65	0.17	0.04	72.07	1.23	1.7
7	327.46	0.15	0.05	52.89	0.79	1.49
8	208.96	0.11	0.05	35.77	0.41	1.15

Näytteellä 2 (taulukot 5.3 ja 5.4) painotustapojen aiheuttamat erot olivat suuremmat. Magneettivuon tiheydellä 4 T laatikkopainotuksella saadaan noin 9 yksikköä suurempi n -arvo kuin noidanhattupainotuksella. Magneettivuon tiheyttä kasvatettaessa erot pienenevät. Suurin ero kriittisessä virrassa esiintyy samoin 4 T:ssa, jossa laatikkopainotuksella määritetty arvo on 804,34 A ja noidanhattupainotuksella 802,78 A, eli ero on noin 1,5 A tai 0,18 %.

Molemmilla näytteillä n -arvo laskee magneettivuon tiheyden kasvaessa, mikä on suprajohteille tyypillistä [19, s. 404]. Virherajat pääosin pienenevät, kun magneettivuon tiheys kasvaa ja kriittinen virta laskee. Hieman muita mittauksia suuremmat virherajat esiintyvät usein 5 T:n vuontiheydellä, Lorentz-voiman maksimin kohdalla.

Taulukko 5.3 Yhteenveto $V(I)$ -mittauksista näytteelle 2 ja käyräsovitteesta noidanhattupainotuksella.

Magneettivuon tiheys (T)	I_c (A)	$I_c:n$ virherajat (A)	$I_c:n$ virherajat (%)	n -arvo	n -arvon virherajat	n -arvon virherajat (%)
4	802.78	0.19	0.02	76.72	1	1.31
5	666.4	0.26	0.04	75	1.54	2.05
6	534.84	0.15	0.03	68.99	0.88	1.27
7	401.33	0.14	0.04	52.32	0.61	1.17
8	267.15	0.11	0.04	37.31	0.37	0.98

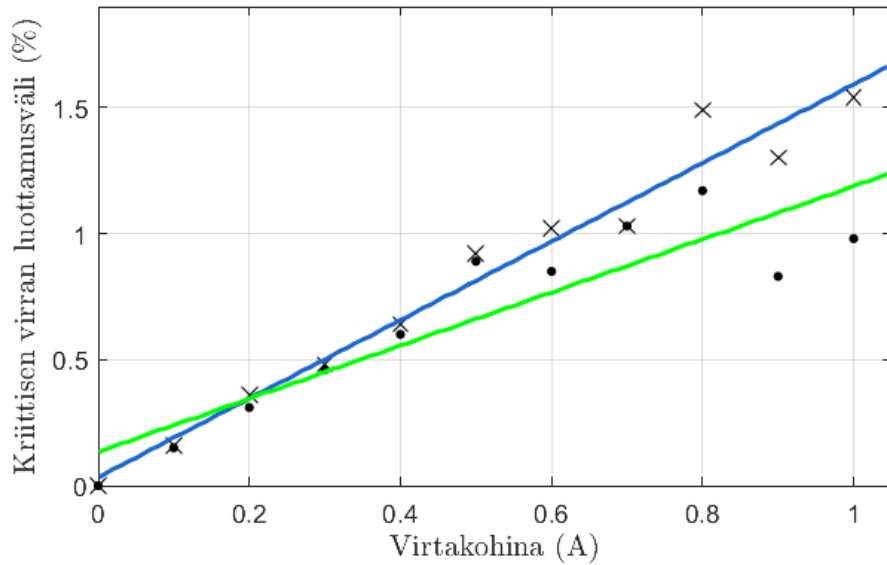
Taulukko 5.4 Yhteenveto $V(I)$ -mittaussarjasta näytteelle 2 ja käyräsovitteesta laatikkopainotuksella.

Magneettivuon tiheys (T)	I_c (A)	$I_c:n$ virherajat (A)	$I_c:n$ virherajat (%)	n -arvo	n -arvon virherajat	n -arvon virherajat (%)
4	804.34	0.25	0.03	86.19	1.53	1.77
5	667.13	0.39	0.06	79.35	2.41	3.03
6	535.17	0.23	0.04	70.91	1.37	1.93
7	401.64	0.15	0.04	53.84	0.65	1.21
8	267.22	0.12	0.04	37.85	0.38	1

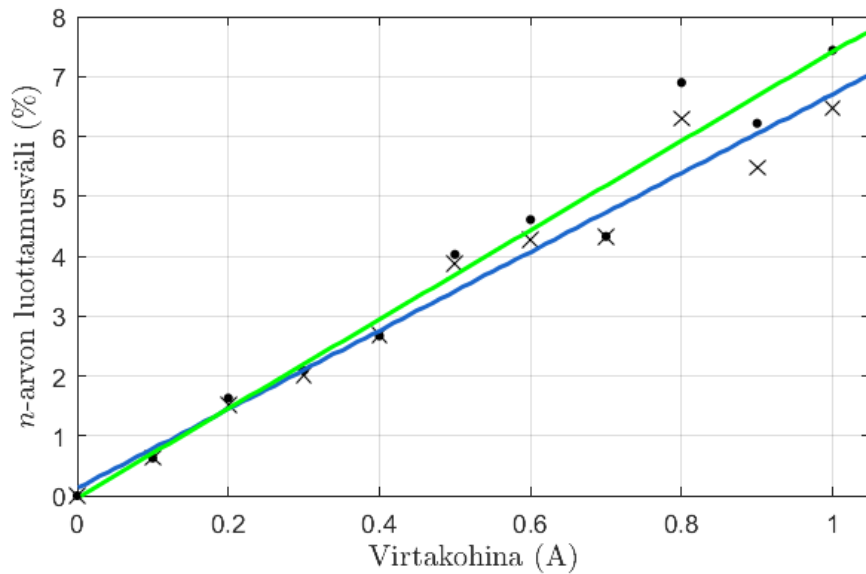
5.2.2 Simulaatioesimerkkejä

Simulaatioesimerkeissä käytettiin kuvitteellista näytettä, jonka $I_c=300$ A, $n=40$ ja jännitekohina 4 %. Tämä vastaa NbTi-johdinta noin 7–8 T:n magneettikentässä. Painotus kohdistui välille 0,1–1 μ V cm. Simulaatioissa potenssilain hakualgoritmi löysi jokaisella kerralla Matlabilla luodun $V(I)$ -ominaiskäyrän kriittisen virran ja n -arvon riippumatta painotustavasta. Eroja painotustavan valinta aiheutti vain virherajoihin. Sen sijaan todellisen datan kanssa painotustapa, kuten edellisessä osiossa kuvattiin, vaikutti kriittiseen virtaan ja n -arvoon.

Laatikkopainotuksen mukaan sovitetuilla käyrillä virtakohina aiheutti keskimäärin suuremmat virherajat kriittiselle virralle kuin noidanhattupainotuksella sovitetuille käyrille. Ero näkyy parhaiten yli 1 A:n virtakohinan simulaatioista kun taas alle 0,7 A:n virtakohinan arvoilla erot ovat mitättömiä. Noidanhattupainotuksen mukaan sovitetuilla käyrillä n -arvon luottamusväli kasvoi enemmän kuin laatikkopainotuksella sovitetuilla käyrillä. Esimerkki tästä on esitetty kuvassa 5.3. Painotustapa vaikuttaa virran varianssin vaikutukseen n -arvon luottamusvälin suuruuteen vähemmän. Tätä havainnollistaa kuva 5.4.



Kuva 5.3 Esimerkki laatikkopainotuksesta ja noidanhattupainotuksesta. Tarkasteltavana on virtakohinan vaikutus kriittisen virran luottamusväliin. Kuvassa rastilla merkityt pisteet ovat tuloksia laatikkopainotuksella sovitetuista $V(I)$ -käyristä ja pisteet tuloksia noidanhattupainotuksella sovitetuista käyristä. Sininen kuvaaja on ensimmäisen asteen polynomisovite laatikkopainotuksen rasteille ja vihreä kuvaaja sovitte noidanhattupainotuksen pisteille.



Kuva 5.4 Esimerkki laatikkopainotuksen ja noidanhattupainotuksen vaikutuksesta n -arvoon. Rastit ovat tuloksia laatikkopainotuksella sovitettujen $V(I)$ -käyrien luottamusvälin rajoista eri virtakohinan arvoilla. Pisteet ovat tuloksia noidanhattupainotuksella sovitettujen $V(I)$ -käyrien määritettyjä virherajoja. Sininen käyrä on sovitettu rastien mukaan, vihreä pisteiden mukaan.

Sovitekäyrän hyvyyttä voidaan tarkastella eri menetelmillä. Näistä ensimmäinen on R^2 , joka on selitysstekerroin. R^2 määritellään yhtälöllä

$$R^2 = \frac{\text{SSR}}{\text{SST}} = 1 - \frac{\text{SSE}}{\text{SST}}, \quad (5.1)$$

jossa SSR on regression neliösumma

$$\text{SSR} = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2, \quad (5.2)$$

jossa

$$\bar{y} = \frac{1}{N} = \sum_{i=1}^N y_i, \quad (5.3)$$

ja \hat{y} on regressiomallin estimoitu vaste.

Kokonaisneliösumman SST (*total sum of squares*) määrittelee yhtälö

$$\text{SST} = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (5.4)$$

[80] ja virheneliösumman SSE (*sum of square errors*) määrittelee yhtälö

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2. \quad (5.5)$$

Muunnettu selitysaste R_{adj}^2 määritellään yhtälöllä

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{n-1}{N-K-1} \frac{\text{SSE}}{\text{SST}}, \quad (5.6)$$

jossa N on otoskoko eli mittauspisteiden lukumäärä ja K regressiomallin muuttujien lukumäärä, joka on 1. asteen soviteella 1.

Keskineliövirheen eli MSE:n (*mean square error*) määrittelee yhtälö

$$\text{MSE} = \frac{\text{SSE}}{N-K-1}, \quad (5.7)$$

ja estimoitu hajonta on $\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}$.

Kahdella painotustavalla tuotettujen käyräsovitteiden hyvydet on esitetty taulukoissa 5.5 ja 5.6. Näistä ensimmäisessä on esitetty virtakohinan vaikutus kriittisen virran luottamusväliin ja toisessa virtakohinan vaikutus n -arvon luottamusväliin.

Taulukot esittävät siis kuvien 5.3 ja 5.4 käyräsovitteiden hyvyttä.

Taulukko 5.5 Laatikkopainotuksen ja noidanhattupainotuksen muutoksen 1. asteen sovitteen hyvyys, siis kuvan 5.3 käyrät. Kohteena virtakohinan vaikutus kriittiseen virtaan. Taulukon A):n tiedot ovat laatikkopainotuksen tulokset ja B):n tiedot noidanhattupainotuksen tulokset.

	SSE	R^2	Muunnettu R^2	RMSE
A)	0.09121	0.9669	0.9633	0.1007
B)	0.2579	0.8256	0.8062	0.1693

Taulukko 5.6 Laatikkopainotuksen ja noidanhattupainotuksen muutoksen 1. asteen sovitteen hyvyys, eli kuvan 5.4 käyrät. Kohteena virtavarianssin 0–1 A vaikutus n -arvon virherajoihin. Taulukon A):n tiedot ovat laatikkopainotuksen tulokset ja B):n tiedot noidanhattupainotuksen tulokset.

	SSE	R^2	Muunnettu R^2	RMSE
A)	1.682	0.9669	0.9658	0.4323
B)	2.148	0.9659	0.9621	0.4885

Selitysaste R^2 ja muunnettu selitysaste R_{adj}^2 ovat sitä lähempänä ykköstä, mitä paremmin mittauspisteet vastaavat sovitekäyrää. Kun muunnettu selitysaste on lähellä selitysastetta, ei sovitekäyrän asteluku ole liian suuri. Selitysaste on yli 0,96 molemmissa tapauksissa laatikkopainotuksella. Käytettyä 1. asteen käyrää voidaan siten pitää sangen hyvänä sovitteena. Jos sovitteena käytetään korkeamman asteen käyrää, R_{adj}^2 laskee. Noidanhattupainotuksella taas virtakohinan vaikutus kriittiseen virtaan antaa 1. asteen sovitteelle R^2 :n tulokseksi vain noin 0,83. Sovite on sopii siis huonommin mittusdataan. Kuten kuvasta 5.3 voi nähdä, kuinka pisteet osuvat melko kauas molemmin puolin vihreää sovitekäyrää. SSE kuvaa virheneliösummaa, eli sitä, kuinka paljon yhteensä kaikkien pisteiden poikkeamien neliöiden summa on. Taulukossa 5.5 noidanhattupainotuksella tämä arvo on lähes kolminkertainen laatikkopainotukseen nähden. Painotusten ero virtakohinan vaikutuksessa n -arvoon on pienempi, kuten kuvasta 5.4 voi nähdä. Laatikkopainotus noudattaa sekä kriittisen virran, että n -arvon luottamusvälien kuvaajissa paremmin 1. asteen sovitekäyrää, kun taas noidanhattupainotus tuottaa selvempiä poikkeamia sovitekäyrään nähden. [80]

Molemmissa tapauksissa noidanhattupainotus tuottaa enemmän poikkeavia datapisteitä laatikkopainotukseen verrattuna. Noidanhattupainotuksen haittapuolena onkin, että pienellä määrällä mittauspisteitä on suuri vaikutus koko käyräsovitteeseen. Jos suuren painotuksen alueelle eli painotusvälin keskelle osuu paljon kohinaa verrattuna muuhun alueeseen, koko sovite kärsii siitä. Noidanhattupainotuksen käyttämistä laatikkopainotuksen sijaan on saatujen tulosten valossa vaikea perustella.

5.3 Cutoff-suodatus

Cutoff-suodatusta käytettäessä poistetaan mittausdatasta $V(I)$ -käyrän loppupään mittauspisteet ja sovitetaan käyrä käyttäen alkupään pisteitä. Simulaatioissa cutoff-suodatuksella ei ole vaikutusta kriittiseen virtaan ja n -arvoon. Luvata OY:n mittausdatan perusteella loppuosan pisteiden pois jättäminen voi loiventaa $V(I)$ -käyrää, jos käyrä on jyrkin loppua kohti. Cutoff-suodatus tuottaa siis alhaisemman n -arvon ja hieman pienemmän kriittisen virran.

Cutoff-suodatusta aiheutetaan jo mittauksissa, joissa virtaa ei yksinkertaisesti nosteta ylemmän sähkökenttäkriteerin tasolle asti. Tällöin painotusalueena käytetään alemman sähkökenttäkriteerin ja korkeimman saavutetun jännitepisteen välistä aluetta. Toisaalta cutoff-suodatuksen käytölle ei ole estettä, jos $V(I)$ -käyrä jatkuu yli sähkökenttäkriteerin $1 \frac{\mu V}{cm}$ ja pois jätetään vain sen jälkeiset mittauspisteet. Käytännössä samaan lopputulokseen päästään myös valitsemalla suuri, (>20) painotuskerroin standardin mukaiselle painotusvälille.

6. YHTEENVETO

Simulaatioiden tarkoituksena oli mallintaa virta- ja jännitekohinan vaikutusta kriittisen virran ja n -arvon variansseihin. Jännite-virta -käyrää simuloitiin potenssilain mukaisilla käyrillä, joihin lisättiin tunnettu Gauss-muotoinen kohina. Virtakohinan vaikutuksen arviomiseksi simulaatiolla luotiin samalla kriittisellä virralla, jännitekohinalla ja n -arvolla $V(I)$ -käyriä, virtakohinaa välillä 0–4 A vaihdellen. Kriittisen virran ja n -arvon virherajat kirjattiin ylös eri virtakohinan arvoilla. Virtakohina esitettiin kriittisen virran virherajojen funktiona ja n -arvon virherajojen funktiona. Jännitekohinan vaikutuksen arviomiseksi simulaatiolla luotiin samoilla parametreillä $V(I)$ -käyriä, vain jännitekohinaa välillä 0–25 % jännitekriteeristä vaihdellen. Kriittisen virran ja n -arvon varianssi kirjattiin ylös eri virtakohinan arvoilla. Jännitekohina esitettiin kriittisen virran virherajojen funktiona ja n -arvon virherajojen funktiona. Virtakohina aiheuttaa suurimman osan johdinten kriittisen virran ja n -arvon virherajoista. Virtakohinan kaksinkertaistaminen lähes kaksinkertaistaa virherajat. Sen sijaan jännitekohinan vaikutus virherajoihin on pieni. Realistisilla kohinan arvoilla, enintään 0,75 A virrassa ja 4 % jännitekriteeristä jännitteessä, jännitekohinan vaikutus on noin kertaluokan pienempi virtakohinan vaikutukseen verrattuna. Suurilla virtakohinan arvoilla jännitekohinan vaikutus on häviävä. Todellisten näytteiden ja simulaatioiden ero on, että todellisuudessa johtimien $V(I)$ -käyrät eivät aina täysin noudata potenssifunktiota.

Mittausdatan käsittelyyn liittyviä tekijöitä ja varsinkin sovitekäyrän asettamista tarkasteltiin. $V(I)$ -käyrän sovittamiselle kehitettiin toistettava menetelmä ja V-I-analysointityökalulle kirjoitettiin mittausmanuaali. Työn tuloksena jännitteen ja virran varianssien vaikutusta tuloksiin pystytään arvioimaan aiempaa tarkemmin ja esimerkiksi potenssilain mukaisen käyräsovitteen asettamista mittausdataan voidaan muokata. V-I-analysointityökalu on aiempaa Luvatan käyttämää analysointiohjelmaa helppokäyttöisempi, sillä $V(I)$ -mittauksen perusteet tuntevalle henkilölle käyttö voidaan opettaa minuuteissa. Lisäksi uusi työkalu toimii ilman lataustaukoja ja on yhteensopiva nykyisten Windows-käyttöjärjestelmien kanssa. Kriittisen virran ja n -arvon virherajojen tunteminen voi olla myös liiketaloudellinen etu, jos sitä käyttää esimerkiksi yhtenä johtimen hinnoitteluperusteena.

LÄHTEET

- [1] Y. Ando, G. Boebinger, A. Passner, L. Schneemeyer, T. Kimura, M. Okuya, S. Watauchi, J. Shimoyama, K. Kishio, K. Tamasaku, *et al.*, “Resistive upper critical fields and irreversibility lines of optimally doped high- t_c cuprates,” *Physical Review B*, vol. 60, no. 17, p. 12475, 1999.
- [2] A. Ballarino and R. Flükiger, “Status of MgB_2 wire and cable applications in europe,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 871, no. 1. IOP Publishing, 2017, p. 012098.
- [3] E. Barzi *et al.*, “Error analysis of short sample j_c measurements at the short sample test facility,” *Fermilab, TD-98-055, Sept*, 1998.
- [4] R. Bellis and Y. Iwasa, “Quench propagation in high t_c superconductors,” *Cryogenics*, vol. 34, no. 2, pp. 129–144, 1994.
- [5] T. G. Berlincourt, R. R. Hake, and D. H. Leslie, “Superconductivity at high magnetic fields and current densities in some Nb-Zr alloys,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 6, pp. 671–674, Jun 1961. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.6.671>
- [6] T. Berlincourt, “Emergence of Nb-Ti as supermagnet material,” *Cryogenics*, vol. 27, no. 6, pp. 283–289, 1987.
- [7] H. Boenig and J. Hauer, “Commissioning tests of the bonneville power administration 30 mj superconducting magnetic energy storage unit,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 2, pp. 302–312, 1985.
- [8] S. Bray, L. F. Goodrich, and W. Dubé, “Battery-powered current supply for superconductor measurements,” *Review of scientific instruments*, vol. 60, no. 2, pp. 261–264, 1989.
- [9] R. Brown, Y. C. N. Cheng, E. M. Haacke, M. R. Thompson, and R. Venkatesan, *Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design: Second Edition*. Wiley Blackwell, 6 2014.
- [10] C. Buzea and T. Yamashita, “Review of the superconducting properties of MgB_2 ,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 14, no. 11, p. R115, 2001.
- [11] C. Cheng, Y. Yang, P. Munroe, and Y. Zhao, “Comparison between nano-diamond and carbon nanotube doping effects on critical current density and

- flux pinning in MgB_2 ,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, no. 3, p. 296, 2007.
- [12] I. Chong, Z. Hiroi, M. Izumi, J. Shimoyama, Y. Nakayama, K. Kishio, T. Terashima, Y. Bando, and M. Takano, “High critical-current density in the heavily Pb-doped $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ superconductor: Generation of efficient pinning centers,” *Science*, vol. 276, no. 5313, pp. 770–773, 1997.
- [13] C. Chu, L. Deng, and B. Lv, “Hole-doped cuprate high temperature superconductors,” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 514, pp. 290–313, 2015.
- [14] T. C. Cosmus and M. Parizh, “Advances in whole-body mri magnets,” *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2104–2109, 2011.
- [15] R. Cummings and W. Latham, “Experimental measurement of the dependence of the H–I curve of Nb–Zr wire on temperature,” *Journal of Applied Physics*, vol. 36, no. 9, pp. 2971–2973, 1965.
- [16] D. Dew-Hughes, “The critical current of superconductors: an historical review,” *Low Temperature Physics*, vol. 27, no. 9, pp. 713–722, 2001.
- [17] D. Dimos, P. Chaudhari, and J. Mannhart, “Superconducting transport properties of grain boundaries in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ bicrystals,” *Phys. Rev. B*, vol. 41, pp. 4038–4049, Mar 1990. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.41.4038>
- [18] W. Dube and L. F. Goodrich, “Quench detector circuit for superconductor testing,” *Review of scientific instruments*, vol. 57, no. 4, pp. 680–682, 1986.
- [19] J. Ekin, *Experimental techniques for low-temperature measurements: cryostat design, material properties and superconductor critical-current testing*. Oxford university press, 2006.
- [20] —, “Current transfer in multifilamentary superconductors. i. theory,” *Journal of Applied Physics*, vol. 49, no. 6, pp. 3406–3409, 1978.
- [21] —, “Irregularity in Nb-Ti filament area and electric field versus current characteristics,” *Cryogenics*, vol. 27, no. 11, pp. 603–607, 1987.
- [22] J. Evetts, “The characterization of superconducting materials-conflicts and correlations,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 19, no. 3, pp. 1109–1119, 1983.

- [23] W. H. Fietz, M. J. Wolf, A. Preuss, R. Heller, and K.-P. Weiss, “High-current hts cables: Status and actual development,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1–5, 2016.
- [24] R. Flükiger, H. Suo, N. Musolino, C. Beneduce, P. Toulemonde, and P. Lezza, “Superconducting properties of MgB_2 tapes and wires,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 385, no. 1-2, pp. 286–305, 2003.
- [25] F. Frickett and A. Clark, “Development of standards for superconductors. annual report for fy 1979,” National Engineering Lab.(NBS), Tech. Rep., 1979.
- [26] G. Fujii, “Present practices in japan for the measurement and definition of various superconducting parameters,” *Cryogenics*, vol. 21, no. 1, pp. 21–38, 1981.
- [27] H. Fujii, K. Togano, and H. Kumakura, “Enhancement of critical current densities of powder-in-tube processed MgB_2 tapes by using MgH_2 as a precursor powder,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 15, no. 11, p. 1571, 2002.
- [28] S. R. Ghorbani, X. Wang, S. X. Dou, S.-I. Lee, and M. Hossain, “Flux-pinning mechanism in silicone-oil-doped MgB_2 : Evidence for charge-carrier mean free path fluctuation pinning,” *Physical Review B*, vol. 78, no. 18, p. 184502, 2008.
- [29] B. Glowacki, M. Majoros, M. Vickers, J. Evetts, Y. Shi, and I. McDougall, “Superconductivity of powder-in-tube MgB_2 wires,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 14, no. 4, p. 193, 2001.
- [30] L. Goodrich and A. Srivastava, “Critical current measurement methods: quantitative evaluation,” *Cryogenics*, vol. 35, pp. S19–S23, 1995.
- [31] L. F. Goodrich and S. Bray, “Current ripple effect on superconductive dc critical current measurements,” *Cryogenics*, vol. 28, no. 11, pp. 737–743, 1988.
- [32] —, “Critical current measurements of Nb_3Sn superconductors: Nbs contribution to the vamas interlaboratory comparison,” *Cryogenics*, vol. 29, no. 7, pp. 699–709, 1989.
- [33] —, “High t_c superconductors and critical current measurement,” *Cryogenics*, vol. 30, no. 8, pp. 667–677, 1990.
- [34] L. F. Goodrich and F. Fickett, “Critical current measurements: a compendium of experimental results,” *Cryogenics*, vol. 22, no. 5, pp. 225–241, 1982.
- [35] L. F. Goodrich and J. D. Splett, “Current ripple effect on n -value,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 2603–2606, 2007.

- [36] L. F. Goodrich, A. Srivastava, M. Yuyama, and H. Wada, “n-value and second derivative of the superconductor voltage-current characteristic,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 3, no. 1, pp. 1265–1268, 1993.
- [37] L. F. Goodrich and T. C. Stauffer, “Hysteresis in transport critical-current measurements of oxide superconductors,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 11, no. 1, pp. 3234–3237, 2001.
- [38] L. F. Goodrich, D. F. Vecchia, E. Pittman, and A. F. Clark, “Critical current measurements on a NbTi superconducting wire standard reference material,” in *Advances in Cryogenic Engineering Materials*. Springer, 1984, pp. 953–960.
- [39] K. Heine, J. Tenbrink, and M. Thöner, “High-field critical current densities in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+x}/\text{Ag}$ wires,” *Applied Physics Letters*, vol. 55, no. 23, pp. 2441–2443, 1989.
- [40] H. Hosono, K. Tanabe, E. Takayama-Muromachi, H. Kageyama, S. Yamanka, H. Kumakura, M. Nohara, H. Hiramatsu, and S. Fujitsu, “Exploration of new superconductors and functional materials, and fabrication of superconducting tapes and wires of iron pnictides,” *Science and Technology of Advanced Materials*, vol. 16, no. 3, p. 033503, 2015.
- [41] J. Hur, K. Togano, A. Matsumoto, H. Kumakura, H. Wada, and K. Kimura, “Fabrication of high-performance MgB_2 wires by an internal mg diffusion process,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, no. 3, p. 032001, 2008.
- [42] Y. Iwasa, “Design and operational issues for 77-k superconducting magnets,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 2, pp. 1211–1214, 1988.
- [43] —, “Stability and protection of superconducting magnets-a discussion,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 1615–1620, 2005.
- [44] —, *Case studies in superconducting magnets: design and operational issues; 2nd ed.* Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [45] J. Jiang, W. Starch, M. Hannion, F. Kametani, U. Trociewitz, E. Hellstrom, and D. Larbalestier, “Doubled critical current density in Bi-2212 round wires by reduction of the residual bubble density,” *Superconductor science and technology*, vol. 24, no. 8, p. 082001, 2011.
- [46] Z. Ke, Q. Xing, H. Jing, W. Bo, G. Huixian, L. Jianwei, L. Jianfeng, Z. Pingxiang, L. Xianghong, and F. Yong, “Enhanced critical current densities in Nb_3Sn superconducting strands prepared by bronze process,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 3, pp. 1–4, 2018.

- [47] W. Keesom, “On the disturbance of supraconductivity of an alloy by an electric current’,” *Physica*, vol. 2, no. 1-12, pp. 35–36, 1935.
- [48] Y. Kim, C. Hempstead, and A. Strnad, “Critical persistent currents in hard superconductors,” *Physical Review Letters*, vol. 9, no. 7, p. 306, 1962.
- [49] —, “Flux-flow resistance in type-ii superconductors,” *Physical Review*, vol. 139, no. 4A, p. A1163, 1965.
- [50] M. Kiuchi, E. Otabe, T. Matsushita, T. Kato, T. Hikata, and K. Sato, “Pinning-force density of superconducting Bi-2223 tape wires,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 260, no. 3-4, pp. 177–187, 1996.
- [51] R. Kleiner and W. Buckel, *Superconductivity: An Introduction*. John Wiley & Sons, 2015.
- [52] S.-i. Kobayashi, T. Kaneko, T. Kato, J. Fujikami, and K.-i. Sato, “A novel scaling of magnetic field dependencies of critical currents for Ag-sheathed Bi-2223 superconducting tape,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 258, no. 3, pp. 336–340, 1996.
- [53] H. Kumakura, “Development and prospects for the future of superconducting wires,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 1R, p. 010003, 2011.
- [54] J. Kunzler, “Superconductivity in high magnetic fields at high current densities,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 33, no. 4, p. 501, 1961.
- [55] D. Larbalestier, A. Gurevich, D. M. Feldmann, and A. Polyanskii, “High- t_c superconducting materials for electric power applications,” *Nature*, vol. 414, no. 6861, p. 368, 2001.
- [56] D. C. Larbalestier, J. Jiang, U. a. Trociewitz, F. Kametani, C. Scheuerlein, M. Dalban-Canassy, M. Matras, P. Chen, N. Craig, P. Lee, *et al.*, “Isotropic round-wire multifilament cuprate superconductor for generation of magnetic fields above 30 t,” *Nature materials*, vol. 13, no. 4, p. 375, 2014.
- [57] J. Leclerc, K. Berger, B. Douine, and J. Leveque, “Enhancement of the $e(j, b)$ power law characterization for superconducting wires from electrical measurements on a coil,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 3, pp. 6 400 504–6 400 504, 2012.
- [58] P. J. Lee and D. C. Larbalestier, “Microstructural factors important for the development of high critical current density Nb_3Sn strand,” *Cryogenics*, vol. 48, no. 7-8, pp. 283–292, 2008.

- [59] H. Leibrock, F. Hornung, M. Kläser, H. Müller, and T. Schneider, “Error analysis of c (i)-measurements on nbt_i-superconductors,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 401, no. 1, pp. 255–259, 2004.
- [60] G. Li, M. Sumption, M. Susner, Y. Yang, K. Reddy, M. Rindfleisch, M. Tomsic, C. Thong, and E. Collings, “The critical current density of advanced internal-mg-diffusion-processed mgb₂ wires,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 25, no. 11, p. 115023, 2012.
- [61] J. MacManus-Driscoll, S. Foltyn, Q. Jia, H. Wang, A. Serquis, L. Civale, B. Maiorov, M. Hawley, M. Maley, and D. Peterson, “Strongly enhanced current densities in superconducting coated conductors of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x} + \text{BaZrO}_3$,” *Nature materials*, vol. 3, no. 7, p. 439, 2004.
- [62] A. Malagoli, C. Bernini, V. Braccini, C. Fanciulli, G. Romano, and M. Vignolo, “Fabrication and superconducting properties of multifilamentary MgB_2 conductors for ac purposes: twisted tapes and wires with very thin filaments,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 22, no. 10, p. 105017, 2009.
- [63] E. Martínez, P. Mikheenko, M. Martínez-López, A. Millán, A. Bevan, and J. Abell, “Flux pinning force in bulk mg b₂ with variable grain size,” *Physical Review B*, vol. 75, no. 13, p. 134515, 2007.
- [64] L. Masur, D. Bucek, E. Harley, T. Kodenkandath, X. Li, J. Lynch, N. Nguyen, M. Rupich, U. Schoop, J. Scudiere, *et al.*, “The status of commercial and developmental hts wires,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 392, pp. 989–997, 2003.
- [65] K. Matsumoto and P. Mele, “Artificial pinning center technology to enhance vortex pinning in ybco coated conductors,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 23, no. 1, p. 014001, 2009.
- [66] T. Matsushita, M. Kiuchi, A. Yamamoto, J.-i. Shimoyama, and K. Kishio, “Essential factors for the critical current density in superconducting MgB_2 : connectivity and flux pinning by grain boundaries,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, no. 1, p. 015008, 2007.
- [67] B. Matthias, T. Geballe, S. Geller, and E. Corenzwit, “Superconductivity of nb₃sn,” *Physical Review*, vol. 95, no. 6, p. 1435, 1954.
- [68] W. Meissner and R. Ochsenfeld, “Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit,” *Naturwissenschaften*, vol. 21, no. 44, pp. 787–788, 1933.

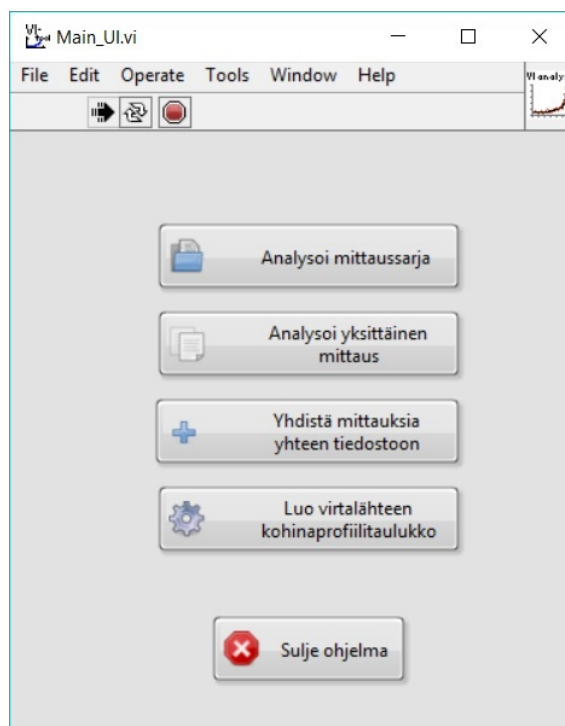
- [69] P. Mele, K. Matsumoto, T. Horide, A. Ichinose, M. Mukaida, Y. Yoshida, S. Horii, and R. Kita, “Ultra-high flux pinning properties of BaMO_3 -doped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ thin films (m= zr, sn),” *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, no. 3, p. 032002, 2008.
- [70] H. Miao, H. Kitaguchi, H. Kumakura, K. Togano, T. Hasegawa, and T. Koizumi, “ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x/\text{Ag}$ multilayer tapes with $j_c > 500\,000\text{ a/cm}^2$ at 4.2 k and 10 t by using pre-annealing and intermediate rolling process,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 303, no. 1-2, pp. 81–90, 1998.
- [71] H. Miao, K. R. Marken, M. Meinesz, B. Czabaj, and S. Hong, “Development of round multifilament Bi-2212/Ag wires for high field magnet applications,” *IEEE Transactions on applied superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 2554–2557, 2005.
- [72] R. Mikkonen, “Suprajohtavuus sähköverkossa,” Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- [73] P. Miranović, K. Machida, and V. G. Kogan, “Anisotropy of the upper critical field in superconductors with anisotropic gaps: Anisotropy parameters of MgB_2 ,” *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 72, no. 2, pp. 221–224, 2003.
- [74] T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Shimoyama, and J. Akimitsu, “Superconductivity in MgB_2 ,” in *Frontiers in Superconducting Materials*. Springer, 2005, pp. 937–981.
- [75] L. Muzzi, L. Affinito, V. Corato, G. De Marzi, A. Di Zenobio, C. F. Zignani, M. Napolitano, S. Turtu, R. Viola, and A. Della Corte, “Magnetic and transport characterization of NbTi strands as a basis for the design of fusion magnets,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 2544–2547, 2009.
- [76] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, “Superconductivity at 39 K in magnesium diboride,” *Nature*, vol. 410, no. 6824, p. 63, 2001.
- [77] D. P. Norton, A. Goyal, J. D. Budai, D. K. Christen, D. M. Kroeger, E. D. Specht, Q. He, B. Saffian, M. Paranthaman, C. E. Klabunde, *et al.*, “Epitaxial $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ on biaxially textured nickel (001): An approach to superconducting tapes with high critical current density,” *Science*, vol. 274, no. 5288, pp. 755–757, 1996.

- [78] M. Parizh, Y. Lvovsky, and M. Sumption, “Conductors for commercial mri magnets beyond NbTi: requirements and challenges,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 1, p. 014007, 2016.
- [79] A. Rimikis, R. Kimmich, and T. Schneider, “Investigation of n-values of composite superconductors,” *IEEE transactions on applied superconductivity*, vol. 10, no. 1, pp. 1239–1242, 2000.
- [80] K. Ruohonen, “Tilastomatematiikka,” Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- [81] V. Sandu, “Pinning-force scaling and its limitation in intermediate and high temperature superconductors,” *Modern Physics Letters B*, vol. 26, no. 14, p. 1230007, 2012.
- [82] K. Sato, T. Hikata, H. Mukai, M. Ueyama, N. Shibuta, T. Kato, T. Masuda, M. Nagata, K. Iwata, and T. Mitsui, “High- j_c silver-sheathed Bi-based superconducting wires,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 27, no. 2, pp. 1231–1238, 1991.
- [83] R. G. Sharma, *Superconductivity: Basics and applications to magnets*. Springer, 2015, vol. 214.
- [84] L. Shubnikov, V. Khotkevich, Y. D. Shepelev, and Y. N. Ryabinin, “Magnetic properties of superconducting metals and alloys,” *Zh. Eksp. Teor. Fiz*, vol. 7, pp. 221–237, 1937.
- [85] F. B. Silsbee, “A note on electrical conduction in metals at low temperatures,” *Journal of the Washington Academy of Sciences*, vol. 6, no. 17, pp. 597–602, 1916. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/24521242>
- [86] Z. Stekly, J. Zar, *et al.*, “Stable superconducting coils,” *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 12, no. 3, pp. 367–372, 1965.
- [87] “Superconductivity - Part 1: Critical Current Measurement - DC critical current of Nb-Ti composite superconductors,” Suomen Standardisoimisliitto SFS. [Online]. Available: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/CENELEC/ID2/6/352043.html.stx>
- [88] K. Togano, J. Hur, A. Matsumoto, and H. Kumakura, “Fabrication of seven-core multi-filamentary MgB₂ wires with high critical current density by an internal Mg diffusion process,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 22, no. 1, p. 015003, 2008.

- [89] M. Tomsic, M. Rindfleisch, J. Yue, K. McFadden, D. Doll, J. Phillips, M. D. Sumption, M. Bhatia, S. Bohnenstiehl, and E. Collings, “Development of magnesium diboride (MgB_2) wires and magnets using in situ strand fabrication method,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 456, no. 1-2, pp. 203–208, 2007.
- [90] M. Tomsic, M. Rindfleisch, J. Yue, K. McFadden, J. Phillips, M. D. Sumption, M. Bhatia, S. Bohnenstiehl, and E. W. Collings, “Overview of MgB_2 superconductor applications,” *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 250–259, 2007. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7402.2007.02138.x>
- [91] F. Voelker, “Resistance in small, twisted, multi-core superconducting wires,” *Particle Accelerators*, vol. 1, 1970.
- [92] H. Wada, C. Walters, L. F. Goodrich, and K. Tachikawa, “Vamas intercomparison of critical current measurements on Nb_3Sn superconductors: a summary report,” *Cryogenics-Guildford*, vol. 34, no. 11, pp. 899–908, 1994.
- [93] X. Wan, Y. Sun, W. Song, K. Wang, L. Jiang, and J. Du, “Enhanced flux pinning of Bi-2223/Ag tapes with nano-MgO particles addition,” *Physica C: Superconductivity*, vol. 307, no. 1-2, pp. 46–50, 1998.
- [94] M. Wilson, “Stabilization of superconductors for use in magnets,” *IEEE Transactions on Magnetism*, vol. 13, no. 1, pp. 440–446, 1977.
- [95] M. N. Wilson, “ NbTi superconductors with low ac loss: A review,” *Cryogenics*, vol. 48, no. 7-8, pp. 381–395, 2008.
- [96] M.-K. Wu, J. R. Ashburn, C. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Wang, and a. Chu, “Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure,” *Physical Review Letters*, vol. 58, no. 9, p. 908, 1987.
- [97] X. Xu, “A review and prospects for Nb_3Sn superconductor development,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 9, p. 093001, 2017.
- [98] G. Yntema, “Niobium superconducting magnets,” *IEEE transactions on magnetism*, vol. 23, no. 2, pp. 390–395, 1987.
- [99] K. Zhang, P. Zhang, J. Guo, J. Jia, Y. Shi, J. Liu, H. Gao, J. Li, X. Liu, and Y. Feng, “Study and manufacture of Nb_3Sn strands by bronze route,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1–4, 2016.

LIITE A. MITTAUSMANUAALI

V(I)-analysointityökalu on LabView-pohjainen Windows-käyttöjärjestelmällä toimiva ohjelma. Tämän manuaalin tarkoituksena on mahdollistaa V-I-analysointityökalun tehokas käyttö. Mittaussarjan analysointi viedään läpi seuraamalla numeroituja kohtia jokaisessa kappaleessa. Numeroimattomat listat antavat lisäohjeita /lisätietoja käyttöön liittyen. Listojen ulkopuoliset tekstinosat sisältävät välittömän käytön suhteen toisarvoisempaa tietoa ohjelman toiminnasta. Ohjelman käynnistäminen avaa kuvan A.1 mukaisen päävalikon.



Kuva A.1 Päävalikko.

A.1 Mittaussarjan analysointi

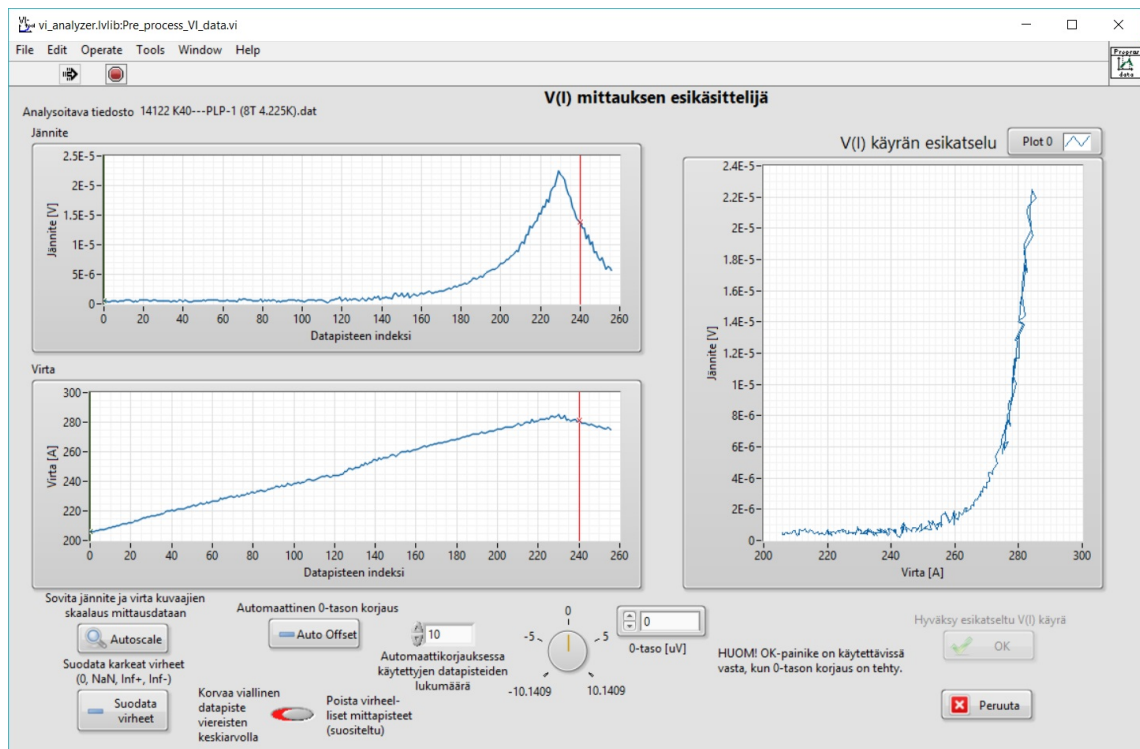
Mittaussarjan analysoinnin tarkoitus on analysoida näytteen mittausdata erikseen eri taustakentissä.

1. Valitse päävalikosta "Analysoi mittaussarja".
2. Valitse vasemmasta yläreunasta "Avaa kansio ja analysoi kaikki".

3. Valitse kansio, jossa mittaussarjan data on ja valitse ”Select Folder”/”Valitse kansio”, jolloin V(I)-mittauksen esikäsittelijä aukeaa.

A.1.1 Esikäsittely

V(I)-mittauksen esikäsittelijän tarkoituksena on valita mittausdatasta potenssilakia noudattava alue eli käytännössä poistaa käyrän lopusta ylimääräiset datapisteet, jotka tallentuvat virran alasajon aikana. Tätä havainnollistaa kuva A.2.



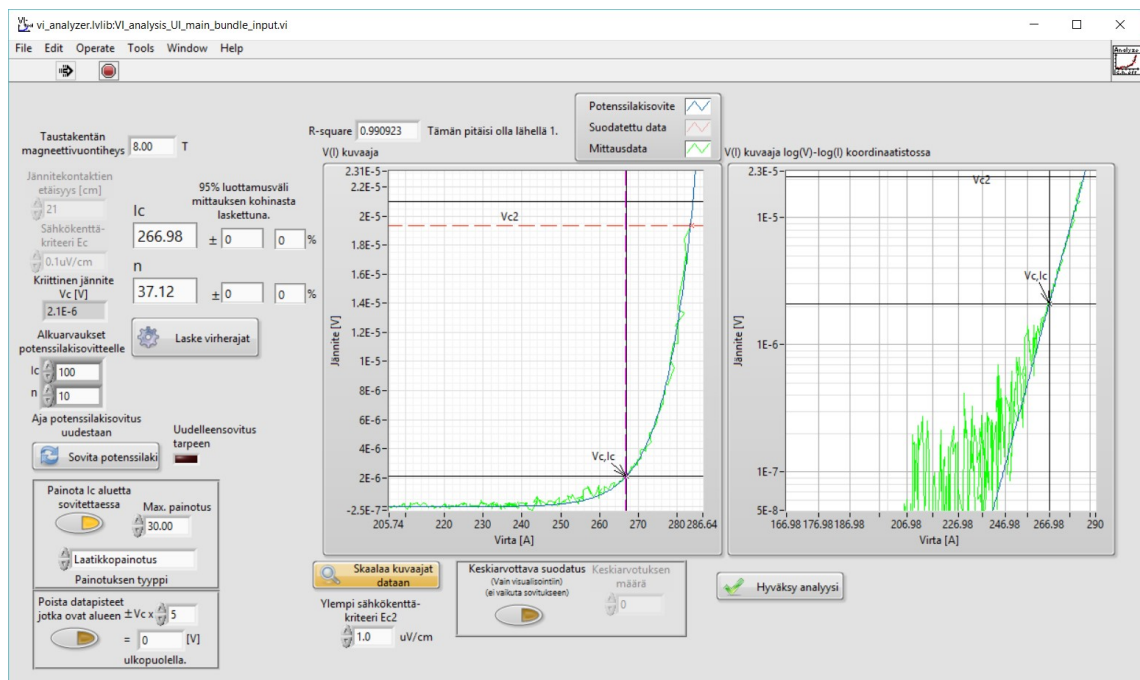
Kuva A.2 V(I)-mittauksen esikäsittelijä.

1. Siirrä punaista kursoria (vasemmanpuoleisten kuvaajien pystysuora viiva) hiiren avulla vasemmalle tai oikealle, kunnes sen vasemmalla puolella on vain nouseva käyrä.
2. Valitse ”Auto Offset”. (Voit vaihtaa automaattikorjauksessa käytettyjen datapisteiden määrää ja painaa ”Auto Offset” uudelleen, mikäli haluat käyttää suurempaa määrää datapisteitä oletusarvoisen 10 datapisteen sijaan.)
3. Valitse ”OK”.

- Jos alkupään datapisteissä on paljon kohinaa, tai jännite selkeästi laskee, siirrä mustaa kursoria (oletusasetuksena kuvaajan vasemmassa reunassa) oikealle, kunnes sen oikealle puolelle jää potenssilain mukaan kulkeva käyrä. Jatkotarkasteluun siirtyvän mittauskäyrän voit nähdä sinisellä piirretyynä ikkunan oikealla puolella.
- Jos mittauksessa on epäjatkuvuuskohtia, esimerkiksi jyrkkiä piikkejä, valitse ”Suodata virheet”.
- Painikkeen ”Suodata virheet” oikealla puolella olevalla kytkimellä voit valita, poistetaanko virheelliset pisteet datasta vai korvataanko ne viereisten pisteiden keskiarvolla. Poistaminen on oletusvalinta.

A.1.2 Jatkokäsittely

- Esikäsittelyn hyväksyminen avaa kuvan A.3 mukaisen ikkunan, jossa on oikealla puolella kaksi kuvaajaa ja vasemmalla puolella valikoita. Tässä näkymässä määritetään potenssilain sovittamisen asetukset.



Kuva A.3 $V(I)$ -analysointityökalun potenssilain sovitusnäky.

- Ohjelma piirtää datapisteiden perusteella potenssilain mukaisen sovitekäyrän sinisenä. Alkuperäinen mittausdata on vihreällä piirretty käyrä.

- Sovitekäyrää hakiessaan työkalu painottaa violetin pystysuoran kursorin ja mustan vaakasuoran kursorin välisen alueen datapisteitä kertoimella 30.
- Oletuksena näiden kursorien väliin jäävä alue on jänniteväli, jota vastaavat sähkökenttäkriteerit $0,1 \frac{\mu V}{cm}$ ja $1 \frac{\mu V}{cm}$.
- Voit tarvittaessa siirtää painotusalueen valintaan käytettäviä kursoreita.
- Voit muuttaa painokerrointa tai painotustapaa alhaalta vasemmalta. Oletusmenetelmä painotukselle on laatikkopainotus, jolloin kaikkia datapisteitä kursorien välillä painotetaan ”Max. painotus” -valinnan lukuarvon verran.

Laatikkopainotuksen sijaan on mahdollista käyttää noidanhattupainotusta, jolloin kursorien välisen alueen keskellä painotus on ”Max. painotus” -valinnan lukuarvon suuruinen ja se vähenee lineaarisesti kummankin kursorin suuntaan. Vasemmasta alakulmasta voidaan valita, että työkalu jättää huomioimatta mittausdatasta kaukana kriittistä jännitettä virtaa datapisteet (tunnetaan myös cutoff-suodatuksena). Keltaisen kytkimen painaminen tekee sen. Nuolinäppäimet ylös ja alas muuttavat rajausalueen kokoa. Siihen voi myös kirjoittaa halutun lukuarvon. Ylempää sähkökenttäkriteeriä voidaan muuttaa alareunassa olevasta valikosta.

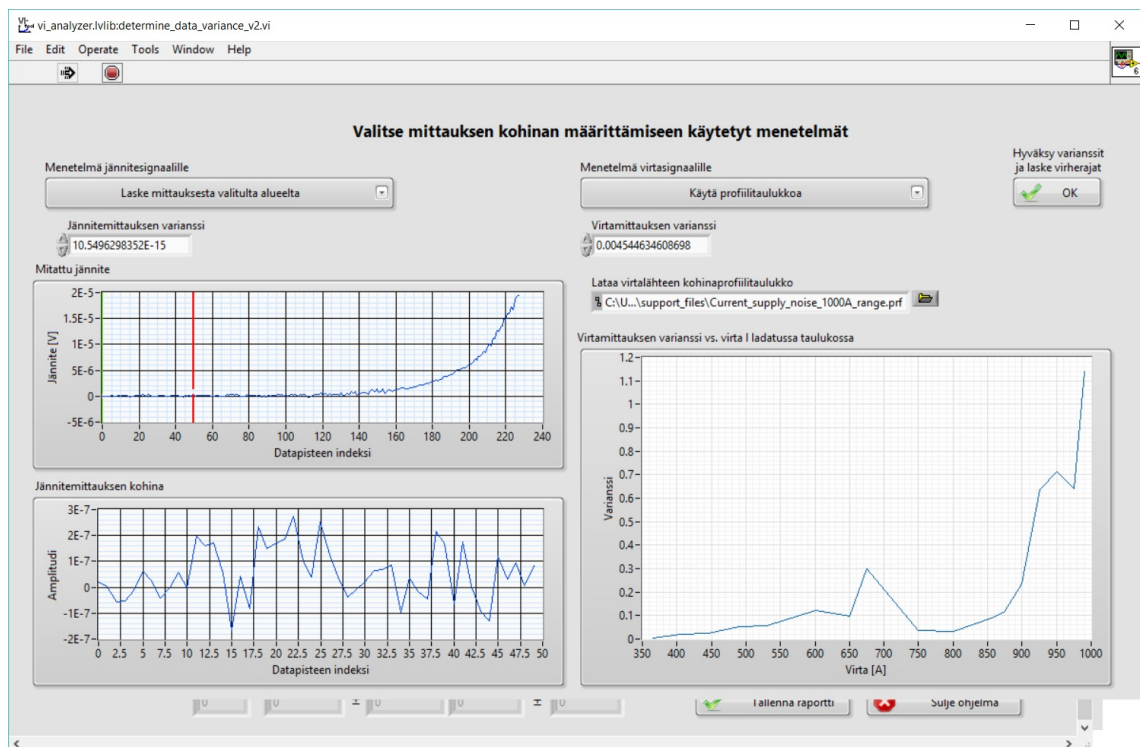
Alareunasta löytyy lisäksi kytkin ”Keskiarvottava suodatus”, jolla voit visualisoida mittausdatan pisteitä tasaisemman käyrämuodon saamiseksi. Tällä tavalla voit vertailla potenssilakia noudattavan sovitekäyrän ja keskiarvotetun mittausdatan yhteensopivuutta. Keskiarvottava suodatus ei vaikuta itse dataan, vaan se ainoastaan visualisoi sitä. Vasemmanpuoleisesta kuvasta on tärkeää katsoa, että mittausdata ja potenssilakisovite osuvat silmämääräisesti kohdakkain. Oikeanpuoleisesta kuvasta voit katsoa, kuinka hyvin mittauspisteet osuvat suoralle $\log(I)$ vs $\log(U)$ -kuvaajalla. Tähän kuvaan sovitetun suoran kulmakerroin on sovitteen, ja siten myös näytteelle määritetty n -arvo.

Kaikki muutokset painotusväliin tai -tapaan johtavat punaisen valon syttymiseen kohdassa ”Uudelleensovitus tarpeen”. Kun olet tehnyt tarvittavat muutokset, sinun on valittava ”Sovita potenssilaki”, ennen kuin pääset laskemaan virherajoja. Kun sovitus on kohdallaan, valitse ”Laske virherajat”.

A.1.3 Luottamusvälien määrittäminen

Kuvan A.4 mukaisessa näkymässä määritetään $I_c:n$ ja $n:n$ luottamusvälit. Ne määritellään mittauksen varianssin perusteella. Jännitemittauksen varianssin määrittäminen

tehdään ikkunan vasemmanpuolisella osalla. Kun varianssin määrittäminen on oletusvaihtoehto, eli ”Laske mittauksesta valitulta alueelta”, tulee valintakursorien olla välillä, jossa jännitteen keskiarvo on nolla, eli jännitesignaali heilahtelee nollatason kummallakin puolella yhtä paljon. Tämä on väli mittauksen alusta enintään niin pitkälle, kunnes jännite alkaa nousta kriittistä virtaa lähestyttäessä. Oletusarvoisesti mukana on 50 ensimmäistä datapistettä. Virtamittauksen varianssi virran



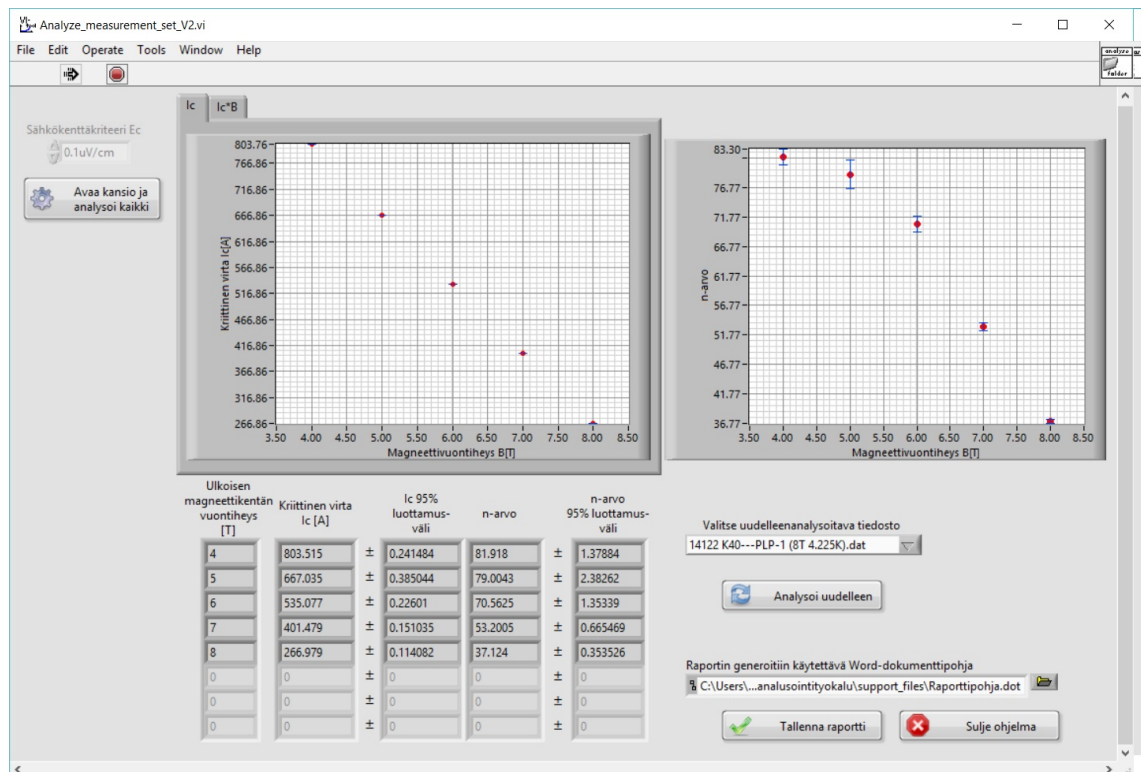
Kuva A.4 Mittausvarianssien määrittäminen.

suhteen määritetään virtalähteen perusteella. Testaajan on siis mitattava virtalähteen varianssi virran funktiona ja tallennettava tämä mittausdata tiedostoksi. Kohinaprofiilin määrittäminen on kokonaan V-I-analysointityökalun toiminnallisuuden ulkopuolella. Jos kohinaprofiilia ei tunneta, voidaan virtavarianssi määrittää myös mittausdatan perusteella. Tällöin valitaan oikean yläreunan tekstin ”Menetelmä virtasignaaliille” alapuolelta pudotusvalikosta ”Laske mittauksesta valitulta alueelta”. Kursorit on syytä asettaa siten, että niiden väliin jäävä virtasignaali on likipitään suora. Jos valitulla välillä on suuria satunnaisvaihteluja, saadaan epärealistisen suuri varianssi. Parhaassa tapauksessa virtalähteen kohinaprofiili on tallennettu tiedostona. Käytettävän virtalähteen kohinaprofiili valitaan kohdasta ”Lataa virtalähteen kohinaprofiilitaulukko”. Tämä valinta lataa viimeisimmän käytetyn kohinaprofiilitaulukon automaattisesti. Kun olet määrittänyt jännitteen ja virran varianssit, valitse ”OK” oikeasta yläreunasta tekstin ”Hyväksy varianssit ja laske virherajat” alta.

1. Tarkista, että vasemmanpuoleiset kuvaajat esittävät jännitettä, jonka keskiarvo on silmämääräisesti katsottuna nolla.
2. Tarkista, että virtavarianssin määrittäminen tapahtuu profiilitaulukon perusteella.
3. Valitse ”OK”.

V-I-analysointityökalu palaa edelliseen näkymään, jossa määritettiin potenssilakisovite mittausdatalle. Nyt I_c :lle ja n :lle on laskettu 95 %:n luottamusväli, joka esitetään sekä absoluuttisesti että prosentteina vastaavasta arvosta.

1. Valitse oikeasta alareunasta ”Hyväksy analyysi”.
2. Käsittele loputkin mittaussarjan mittaukset samoin, kunnes mittaussarja on lopussa.
3. Mittaussarjan lopuksi valitse kuvan A.5 mukaisen näkymän alareunasta ”Tallenna raportti”, jolloin yhteenvedon tiedot tallentuvat MS Word -tiedostoon.



Kuva A.5 Mittaussarjan analysoinnin yhteenvedo.

Kun kaikkien yhden mittaussetin mittausten analyysit on hyväksytty, avautuu kuvan A.5 mukainen näkymä, jossa esitetään kootusti kaikkien analyysien tulokset. Kriittinen virta sekä n -arvo 95 %:n luottamusväleineen magneettivuon tiheyden funktiona on esitetty yläreunan kuvaajissa.

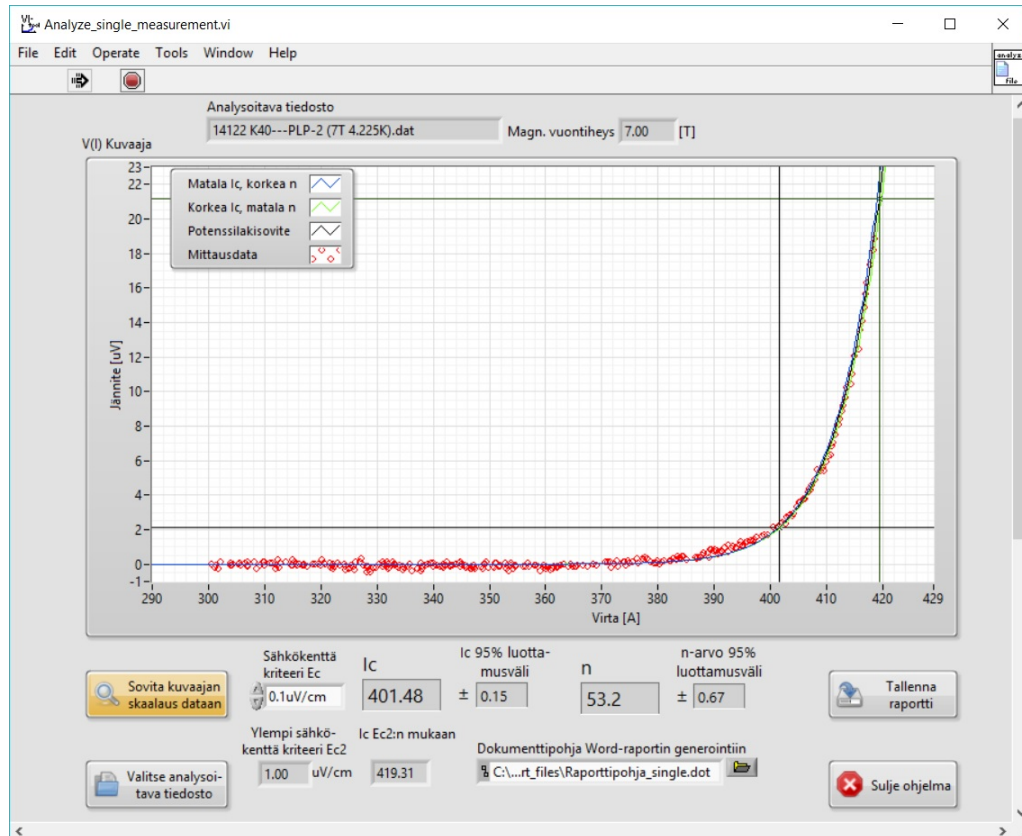
- Voit tarkastella $I_c * B$ vs B -tasoa valitsemalla vasemmanpuoleisen kuvaajan yläreunasta "Ic*B". Tämä esittää maksimaalisen Lorentz-voiman tai sitä vastaan vaikuttavan pinning-voiman.
- Jos jokin mittaustulos halutaan analysoida uudelleen, sen voit tehdä valitsemalla tiedosto keskellä oikealla olevasta valikosta ja valitsemalla "Analysoi uudelleen".

Uudelleenanalysoinnin valitseminen avaa ikkunan, joka kysyy käyttäjältä vahvistuksen, koska uudelleenanalysoinnin aloittaminen poistaa välittömästi kyseisestä datasta (esimerkiksi näyte A 5 T:ssa) aiemmin määritetyt tulokset (I_c , n ja virherajat).

A.2 Analysoi yksittäinen mittaus

1. Valitse analysoitava tiedosto. $V(I)$ -mittauksen esikäsittelijä aukeaa.
2. Toimi kuten mittaussarjan analysoinnissa.
3. Kun valitset "Hyväksy analyysi", näet tarkemman esityksen $V(I)$ -mittausdatasta ja potenssilakisovitteesta.
4. Valitse "Tallenna raportti" tallentaaksesi analysoinnin tulokset Microsoft Word -tiedostoon.

Ainoa ero mittaussarjan analysointiin on, että painikkeen "Hyväksy analyysi" valitsemisen jälkeen avautuu kuvan A.5 yhteenvedon sijaan tarkempi näkymä näytteen $V(I)$ -mittausdatasta ja potenssilakisovitteesta, kuten kuvassa A.6. Potenssilakisovite määritetyllä kriittisellä virralla ja n -arvolla on piirretty mustalla kuvaan ja mittapisteet punaisella. Sininen ja vihreä käyrä näyttävät maksimaalisen vaihteluvälin potenssilakisovitteelle 95 %:n luottamusvälillä molemmille suureille. Sinisellä näkyy potenssilakisovite tilanteelle, jossa kriittinen virta on lasketun luottamusvälin verran alhaisempi ja n -arvo luottamusvälinsä verran korkeampi. Vihreällä näkyy potenssilakisovite tilanteelle, jossa kriittinen virta on luottamusvälinsä verran korkeampi ja n -arvo luottamusvälinsä verran matalampi kuin siis määritetyllä, mustalla potenssilakisovitteella.



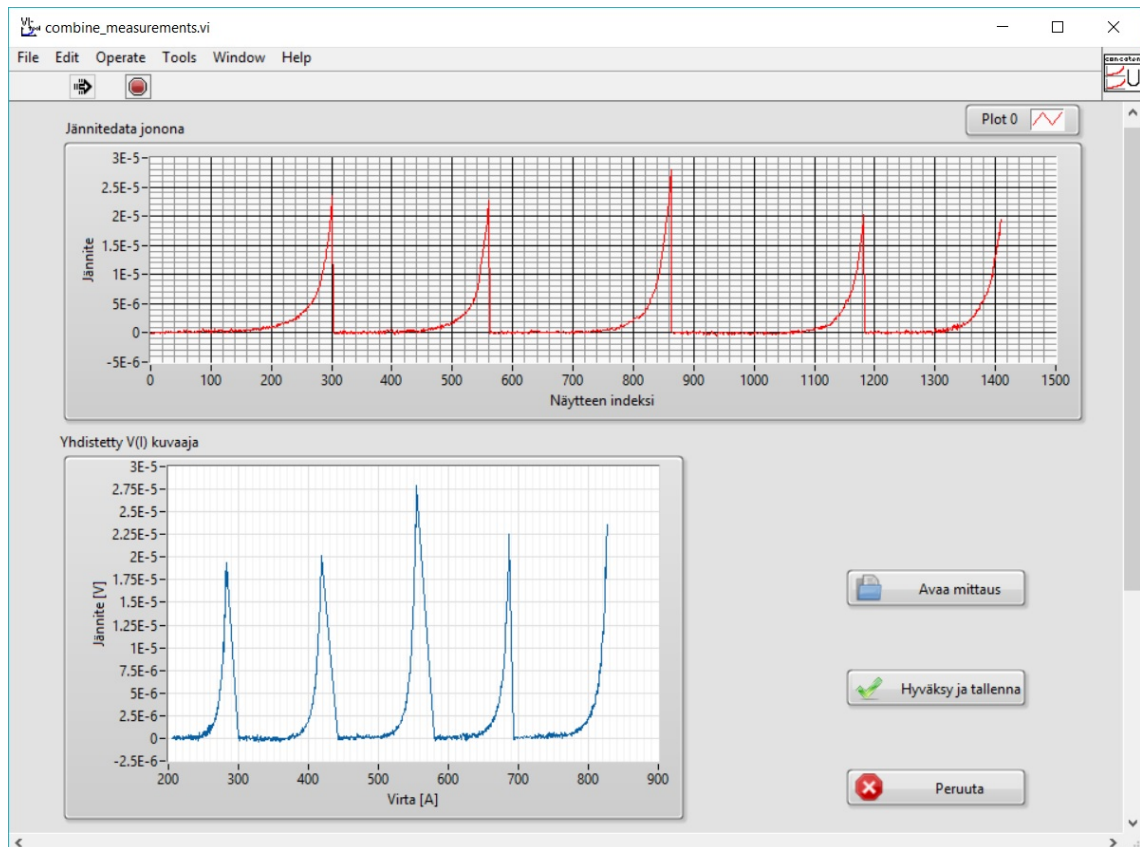
Kuva A.6 Yksittäisen mittauksen analyysin yhteenveto.

- Voit kohdistaa tarkastelun pienemmälle alueelle valitsemalla pisteen ja raahaamalla kursoria diagonaalisesti niin, että haluamasi alue jää kursorin luoman suorakulmion sisäpuolelle. Valitsemalla haluttu alue kuvaajasta, se kohdistuu valitulle alueelle.
- Oikeasta alanurkasta "Valitse analysoitava tiedosto" avaa valintaikkunan uudelle analysoitavalle yksittäiselle tiedostolle.

A.3 Yhdistä mittauksia yhteen tiedostoon

Tässä tilassa voidaan tarkastella (mieluiten) saman näytteen eri mittauksen $V(I)$ -käyriä peräjäkeen aseteltuina, kuten kuvassa A.7. Tämä ominaisuus on lisätty Luvata OY:n toivomuksesta. Näkymässä voidaan esimerkiksi havainnollistaa kriittisen virran tai koko $V(I)$ -käyrämuodon rippuvuutta magneettivuon tiheydestä, käyrät vasemmalta oikealle ovat saman näytteen $V(I)$ -käyriä magneettivuon tiheyksillä kahdeksasta neljään teslaa.

1. Valitse kuvan A.7 mukaisesta näkymästä oikealta "Avaa mittaus" ja valitse sieltä haluttu tiedosto. $V(I)$ -mittauksen esikäsittelijä aukeaa.



Kuva A.7 Mittausten yhdistäminen samaan tiedostoon.

2. Kun olet mahdollisesti poistanut virheelliset datapisteet ja tehnyt offset-korjauksen, "OK":n valitseminen palauttaa näkymän "yhdistä mittauksia yhteen tiedostoon" -aloitusikkunaan, niin että valitun mittauksen $V(I)$ -käyrä on nyt liitetty alun perin tyhjiin kuvaajiin.
3. Valitse ja esikäsitle muut näytteestä otetut mittaukset.
4. Valitse lopuksi "Hyväksy ja tallenna". Oletuksena tallennuskohde on sama kansio, jossa alkuperäinen mittausdata sijaitsee.

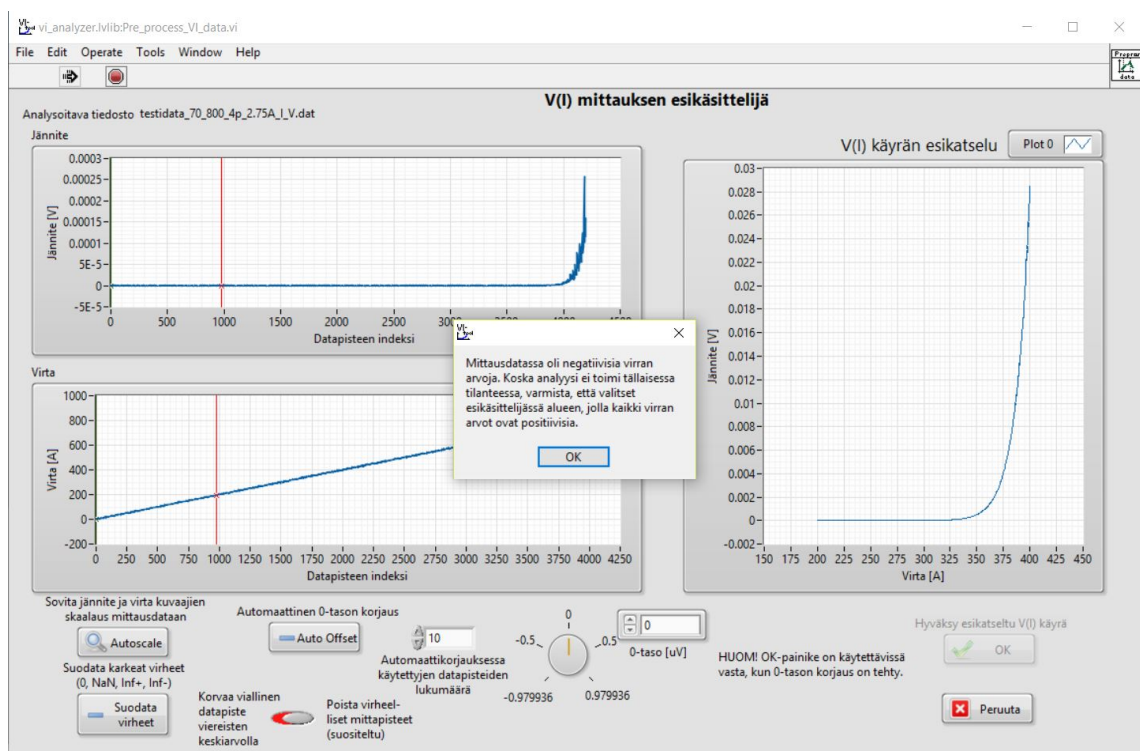
A.4 Virtalähteen kohinaprofiilin määrittäminen

- Jos virtalähteen kohina virran suhteen on tunnettu, voit tuottaa kohinaprofiilitaulukon, joka auttaa virran varianssin ja sitä myöten virherajojen määrittämisessä.
- Jos kohinaprofiilia ei tunneta, voidaan V-I-analysointityökalun avulla arvioida virtavarianssi myös jokaisesta mittauksesta yksitellen.

1. Valitse tiedosto, joka sisältää virtalähteen kohinatiedon.
2. Valitse ”Tallenna taulukko ja sulje ohjelma”.

A.5 Tyypillisiä ongelmia ja bugeja

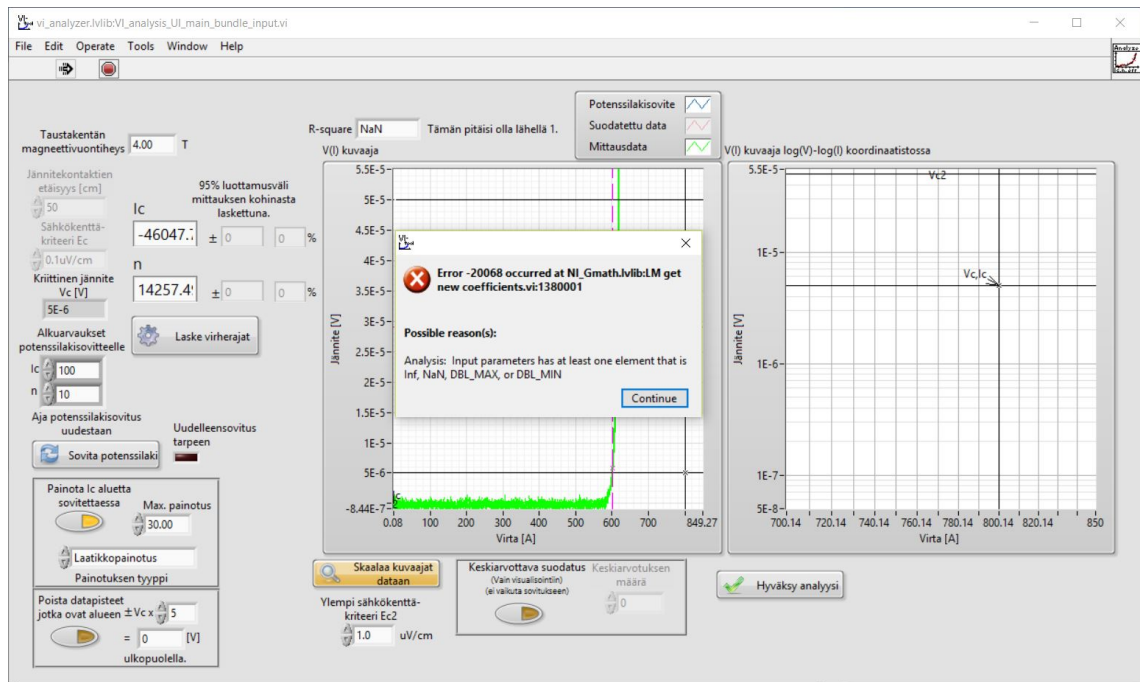
- Jos mittausdatan avattuasi näet kuvan A.8 mukaisen virheilmoituksen, valitse virheilmoituksen alareunasta ”OK” ja sen jälkeen valitse esikäsittelijän vasemmasta reunasta ”Suodata virheet”. Voit jatkaa mittausdatan jatkokäsittelyä normaalisti.



Kuva A.8 Virhe esikäsittelijän avautuessa.

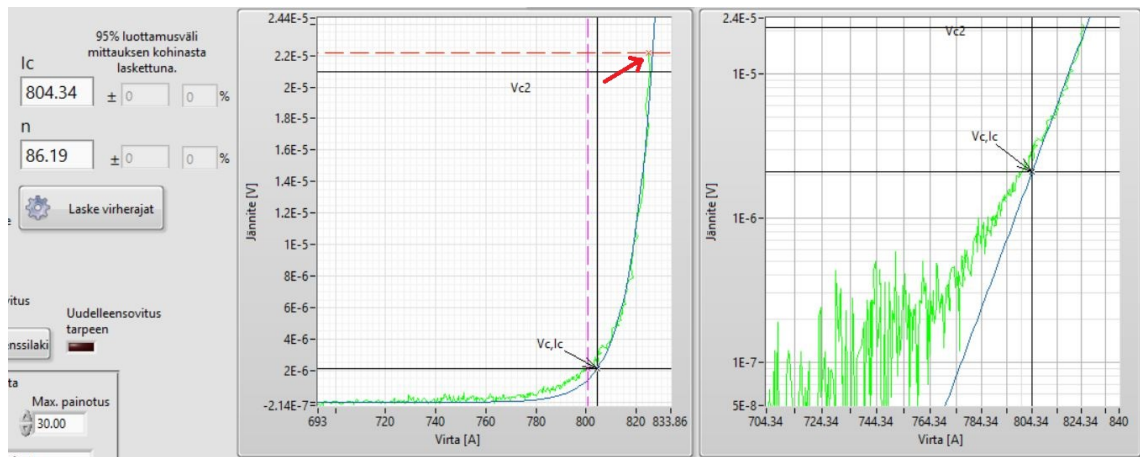
- Jos potenssilain sovitus ei onnistu, koska funktiota hakeva algoritmi ei suppene vaan näkyviin ponnahtaa kuvan A.9 mukainen virheilmoitus, vaaditaan käyttäjältä toimenpiteitä.
- Ongelmana on, että kohdassa ”Alkuarvaukset potenssilakisovitteelle” olevat lukuarvot ovat liian kaukana todellisista arvoista.

1. Valitse virheilmoituksen alareunasta ”Continue”.



Kuva A.9 Virhe potenssilain sovituksessa.

2. Valitse "Alkuarvaukset potenssilakisovitteelle"- kohdan alta I_c , ja muuta se esimerkiksi $100 \rightarrow 500$.
 3. Valitse "Sovita potenssilaki".
- Sovitekäyrä löytyy yleensä tällä tavoin ja voit jatkaa eteenpäin.
 - Jos virran muuttaminen ei riitä, kokeile n -arvon alkuarvauksen muuttamista, esimerkiksi $10 \rightarrow 50$, mutta säilytä I_c -alkuarvaus oletusarvossa 100. Oikeanpuoleinen $\log(U)$ vs $\log(I)$ -kuvaaja muuttuu tällöin lukukelvottomaksi, mutta U vs I -käyrä palautuu potenssilain uudelleensovituksella.
 - Jos datassa on mukana mittauspisteitä ylemmän sähkökenttäkriteerin yläpuolelta, saattavat ne oletuksena sisältyä painotusalueelle, kuten kuvassa A.10.
 - Näin ei kuuluisi käydä, vaan painotusalue tulee rajata ylempään sähkökenttäkriteeriin.
 - Analysointityökalun käyttäjän on huomattava tämä ja rajattava painotusalue siirtämällä punaisella katkoviivalla merkittyä kursoria alas mustalla yhtenäisellä viivalla merkityn ylemmän sähkökenttäkriteerin kohdalle.



Kuva A.10 Virhe painotusalueen valinnassa. Ylemmän sähkökenttäkriteerin jälkeiset pisteet sisältyvät oletuksena painotusalueeseen, mikä nostaa keinotekoisesti n -arvoa.

- Simulaatioilla havaittiin, että jos n -arvo on liian alhainen, luokkaa 10, V-I-analysointityökalun määrittämät arvot I_c :lle ja n :lle voivat olla kauempana todellisista lukuarvoista kuin 95 %:n luottamusvälin rajat.